

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра звукотехніки та реєстрації інформації

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **Г. Г. Власюк**
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності _____ **171 Електроніка**
(код і назва спеціальності)

на тему: " **Система моніторингу параметрів навколишнього** _____
середовища промислового об'єкту" _____

Виконав : студент _____ **6** _____ курсу, групи **ДВ-72мп**
(шифр групи)

_____ **Кондратюк Олександр Сергійович** _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник _____ **доцент, к.т.н., с.н.с., Макаренко В.В.** _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

_____ (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) _____ Факультет електроніки _____
(повна назва)

Кафедра _____ Звукотехніки та реєстрації інформації _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) 171 Електроніка (Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіовізуальних систем) _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Г. Г. Власюк _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Кондратюку Олександрю Сергійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема дисертації : "Система моніторингу параметрів навколишнього середовища промислового об'єкту" _____ ,
науковий керівник дисертації Макаренко В.В., к.т.н., с.н.с., _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018 р. №4114-с

2. Строк подання студентом дисертації 10.12.2018 р. _____

3. Об'єкт дослідження: безпроводова мережева технологія ZigBee, що дозволяє будувати енергоефективні системи _____

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою): телекомунікаційні технології та модулі, які можна застосувати для побудови систем моніторингу та контролю параметрів середовища _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1) Провести огляд літератури, пов'язаної з безпроводовими мережевими технологіями. Дослідити

технологію ZigBee та провести порівняльний аналіз. 2) Розробити структурну, функціональну та електричну принципову схеми на основі яких можна побудувати систему моніторингу параметрів середовища промислового об'єкту

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 25 рис., 20 табл., 1 презентація, 15 слайдів

7. Орієнтовний перелік публікацій «Вибір безпроводової технології передачі даних для використання в виробничо-технологічних мережах», «Використання технології радіочастотної ідентифікації в системах IoT»

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 10.09.2017

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка детального плану дисертаційної роботи, пошук необхідної інформації	12.12.17	
2	Дослідження існуючих систем моніторингу параметрів середовища промислових об'єктів	29.02.18	
3	Опис методів отримання та передачі даних з пристрою	13.04.18	
4	Підготовка електронної версії чорнового варіанту першого розділу	25.05.18	
5	Опис та дослідження побудови систем моніторингу	15.09.18	
6	Узагальнення результатів теоретичних досліджень та моделювання	15.10.18	
7	Підготовка електронної версії остаточного варіанту дисертаційної роботи	15.11.18	
8	Оформлення дисертаційної роботи. Підготовка до захисту.	05.12.18	

Студент

(підпис)

О.С. Кондратюк

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

В.В. Макаренко

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 152 с., 54 рис., 32 табл., 3 дод., 26 джерел.

БЕЗПРОВОДОВА МЕРЕЖА, ДАТЧИК, КЛІМАТ, КООРДИНАТОР, ОСВІТЛЕННЯ, ПОТУЖНІСТЬ, МАРШРУТИЗАТОР, МІКРОКОНТРОЛЕР, МОДУЛЯЦІЯ, СИГНАЛІЗАЦІЯ, ТОПОЛОГІЯ, ТРАНСИВЕР, ФІЛЬТР, ЧУТЛИВІСТЬ, ZIGBEE.

Об'єкт дослідження є безпроводова мережа на основі технології ZigBee для управління інженерними системами промислового тепличного комплексу.

Метою роботи є розробка топології та структурної схеми безпроводової мережі, вибір компонентів для неї, розробка функціональної, принципової схеми модуля контролю мікроклімату теплиці для даної мережі.

Методом дослідження є теоретичне дослідження можливості побудови безпроводової мережі на основі технології ZigBee для використання в системах сигналізації, управління освітленням, кліматом тощо.

В результаті виконання магістерської дисертації були розроблені структурна схема та топологія мережі, функціональна та принципова схеми модуля для контролю клімату теплиці.

Галузь застосування: мережа може використовуватись при створенні систем автоматизованих тепличних комплексів, безпроводових систем сигналізації, сенсорних мереж.

THE SUMMARY

Master's dissertation: 152 p., 54 pic., 32 tabl., 3 appendixes, 26 sources.

WIRELESS NETWORK, SENSOR, CLIMATE, COORDINATOR, LIGHTING, POWER, ROUTER, MICROCONTROLLER, MODULATION, SIGNALIZATION, TOPOLOGY, TRANSIVER, FILTER, SENSITIVITY, ZIGBEE.

The research object is a wireless network based on ZigBee technology for managing the engineering systems of the industrial greenhouse complex.

The purpose of the work is developing the topology and structural scheme of the wireless network, the choice of components for it, the development of a functional, principal scheme of the climate control module for greenhouses for the network.

The research method is a theoretical study of the possibility of building a wireless network based on ZigBee technology for use in alarm systems, lighting control, climate, etc.

As a result of the master's dissertation, a structural scheme and network topology, a functional and principal scheme of the module for climate control of the greenhouse were developed.

Area of application: the network can be used for creating systems of automated greenhouse complexes, wireless signaling systems, sensor networks.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	8
Вступ.....	9
1 Аналітичний огляд	10
1.1 Мережі ZigBee.....	10
1.1.1 Огляд технології ZigBee та її порівняння з аналогічними мережами для IoT	10
1.1.2 Сфера використання технології ZigBee	14
1.1.3 Основні принципи роботи та елементи мережі ZigBee.....	15
1.2 Компоненти мережі ZigBee.....	22
1.2.1 Датчики та способи їх об'єднання для передавання інформації.....	22
1.2.2 Мікроконтролери додатків	38
1.2.3 ZigBee-трансивери та способи збільшення відстані зв'язку	43
1.2.4 Виконавчі механізми.....	50
1.3 Огляд основних функцій системи контролю та управління інженерною інфраструктурою промислового об'єкту	53
2 Розробка структурної та функціональної схем системи	64
2.1 Вибір робочого частотного діапазону.....	64
2.2 Розрахунок ефективної швидкості та часу передавання даних	65
2.3 Вибір топології мережі ZigBee	68
2.4 Розрахунок відстані між вузлами мережі, вибір антен для зв'язку	72
2.5 Розробка структурної схеми системи.....	75
2.6 Розробка функціональної схеми головного модуля управління мікрокліматом теплиці	78

2.6.1 Радіочастотний блок	78
2.6.2 Датчики модуля та обробка даних за допомогою МК	84
2.6.3 Виконавчі механізми та джерело живлення модуля	90
3 Розробка принципової схеми модуля контролю мікроклімату теплиці	93
3.1 Розрахунок ВЧ-генератора датчика вологості ґрунту	93
3.2 Розрахунок DC/DC-перетворювача	102
3.3 Розрахунок смугового LC-фільтру	105
3.4 Розрахунок підсилювача датчика диму	110
3.5 Розрахунок двокаскадного підсилювача датчика руху	112
4 Розроблення стартап-проекту	117
4.1 Опис ідеї проекту	117
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	119
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	120
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	126
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	128
Висновки	131
Перелік джерел посилання	133
Додаток А Abstract	136
Додаток Б Перелік елементів	147
Додаток В Схема електрична принципова	148

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	—	аналогово-цифровий перетворювач;
АЧХ	—	амплітудно-частотна характеристика;
ВЧ	—	високочастотний;
ІЧ	—	інфрачервоний;
ККД	—	коефіцієнт корисної дії;
МК	—	мікроконтролер;
МШП	—	малощумлячий підсилювач;
ОП	—	операційний підсилювач;
ПЗ	—	програмне забезпечення;
ПК	—	персональний комп'ютер;
ПП	—	підсилювач потужності;
СФ	—	смуговий фільтр;
СЧ	—	синтезатор частоти;
УП	—	узгоджуючий пристрій;
ФНЧ	—	фільтр низької частоти;
ФО	—	фазообертач;
ФЧХ	—	фазочастотна характеристика;
ЦАП	—	цифро-аналоговий перетворювач;
ШІМ	—	широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Використання безпроводових технологій у сучасності набуло великого попиту та використовується практично всюди. Застосування електромагнітного передавання даних не лише позбавляє від використання складних кабельних комунікацій, а й надає змогу створювати власні підмережі та контролювати кінцеві пристрої задіяні в ній. Таким чином, можна з легкістю розгортати різноманітні системи, сигналізації чи телеметрії з великою кількістю сенсорів без необхідності проведення великої кількості проводів. При великій кількості параметрів, які контролюється, прокладання проводів з'єднань проблематичне навіть при малих відстанях між датчиків до головного вузла. Таким чином, безпроводові мережі не тільки зручніші, але дають змогу зменшити витрати на створення системи.

Актуальність розроблюваної системи полягає в автоматизації управління промисловим тепличним комплексом за допомогою безпроводових датчиків.

Метою проекту є розробка управлінських рішень для контролю мікрокліматом теплиці, забезпечення пожежної та охоронної сигналізації, передавання на пункт диспетчера даних датчиків, управління освітленням тощо.

Методом проектування є теоретична розробка безпроводової мережі датчиків, розрахунок необхідних параметрів мережі, а також приклад проектування кінцевого вузла системи.

Об'єкт дослідження є безпроводова мережа на основі технології ZigBee для управління інженерними системами, а предметом – принципи контролю, передавання та обробки даних в мережах датчиків.

Новизна роботи полягає в розробці ZigBee-модуля координатора для управління мікрокліматом об'єкта та системами безпеки. Готових рішень на ринку сьогодні немає.

Практична цінність полягає в тому, що матеріали, які вивчені та систематизовані в проекті, можуть бути використанні під час створення безпроводових систем управління об'єктом чи в наукових цілях.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Мережі ZigBee

1.1.1 Огляд технології ZigBee та її порівняння з аналогічними мережами для IoT

Сьогодні основними безпроводовими технологіями є WiFi і Bluetooth, які набули широкого поширення. Відповідно можна зазначити наступні основні стандарти в галузі безпроводових мереж:

- IEEE 802.11 – Wireless Local Area Network (WLAN – безпроводові локальні обчислювальні мережі);
- IEEE 802.15 – Wireless Personal Area Network (WPAN – безпроводові персональні обчислювальні мережі);
- IEEE 802.16 – Broadband Wireless Access (BWA – безпроводовий широкосмуговий доступ).

В даній роботі будуть розглянуті WPAN-мережі, зокрема, мережі ZigBee та новий стандарт IEEE 802.15.4. Мережеві стандарти 802.11 та 802.16 приводяться тут лише для порівняння.

Безпроводова персональна обчислювальна мережа WPAN являє собою локальну мережу з невеликим радіусом дії 15...20 м, і призначена для заміни кабельних з'єднань між персональними комп'ютерами, а також для зв'язку з різноманітною периферією та мультимедіа-системами (КПК, принтери, факси, сканери стереосистеми і т. д.). Відповідно для обміну інформацією між такими системами необхідна висока швидкість передавання даних, що й забезпечують стандарти специфікацій WiFi і Bluetooth. Вони підходять для передавання великих об'ємів інформації (голос, відео, дані) з великою швидкістю (1 – 200 Мбіт/с). Ці стандарти дозволяють замінити проводові з'єднання в пристроях, з якими ми маємо справу кожен день (комп'ютери, обчислювальні мережі тощо).

Але існує велика кількість систем (різноманітні датчики, системи збору інформації і т.д.), які мають специфіку, внаслідок якої в такого роду додатках

неможливо ефективно використовувати згадані вище технології. Для реалізації подібних задач був розроблений стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) для низькошвидкісних WPAN-мереж [5] (рис. 1.1).

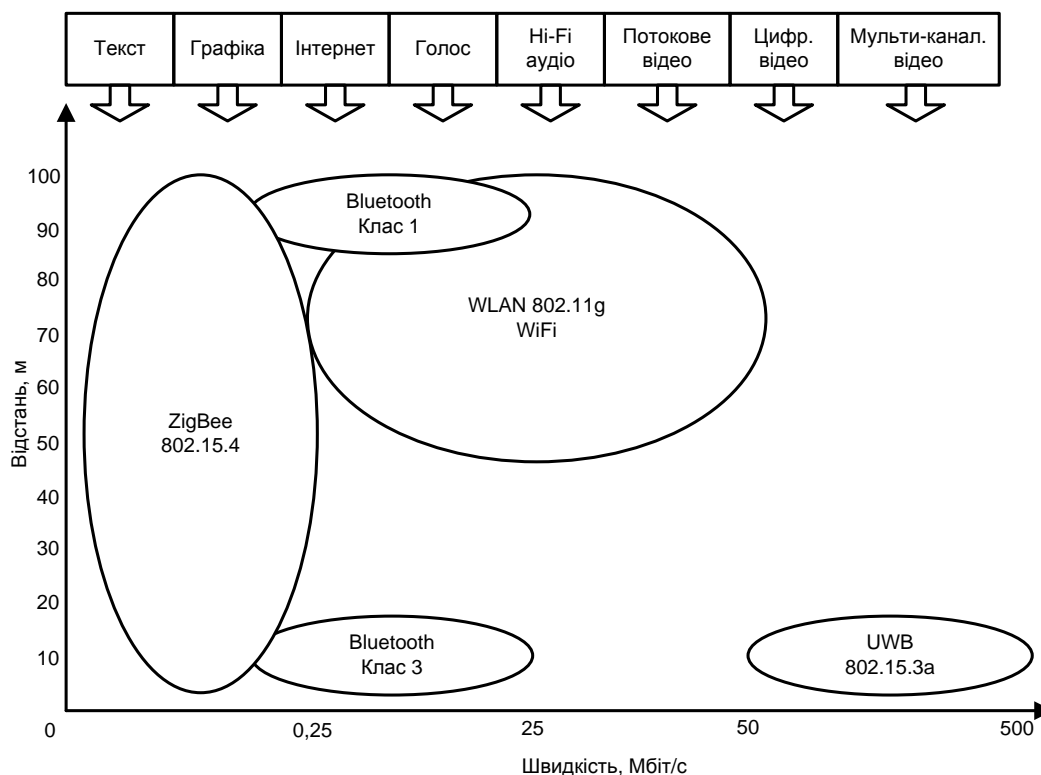


Рисунок 1.1 – Класифікація основних безпроводових стандартів

Технологія ZigBee (рис. 1.1) займає раніше відсутній тип радіоінтерфейсів, замість якого використовували системи і технології з більш високими технічними характеристиками і, відповідно, більш дорогі, або рішення, які ґрунтуються на окремих мікросхемах радіотрансиверів різних виробників електронних компонентів, що не мають під собою жорстко стандартизованої бази. Розробники вимушені були йти на підвищення витрат при розв'язанні простих задач або створювати свої протоколи передавання та програмні стеки для організації персональних безпроводових мереж, що також відображалось на вартості кінцевого виробу і строках виходу готового продукту на ринок. В результаті часто втрачалась новизна та інтерес ринку до продукції.

Порівняльні характеристики [5] основних стандартів безпроводових мереж наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння стандартів сімейства 802.15 та 802.11b

Стандарт	802.15.4 ZigBee			802.15.1 Bluetooth	802.15.3 High Rate WPAN, WiMedia	802.15.3a UWB	802.11b WiFi
Додатки	Моніторинг, управління, мережі датчиків, автоматика			Голос, дані, заміна кабеля	Потокове мультимедіа, заміна кабелів аудіо/відеосистем		Дані, відео, ЛВС
Переваги	Ціна, енергозбереження, розміри мережі	+	глобальний діапазон	Ціна, енергозбереження, передавання голосу, перескоки частоти	Висока швидкість, енергозбереження		Швидкість, гнучкість
Частота, ГГц	0,868	0,915	2,4			3,1...10,6	2,4
Макс. швидкість	20 кбіт/с	40 кбіт/с	250 кбіт/с	1...24 Мбіт/с (в залежності від версії)	22 Мбіт/с	110, 200, 480 Мбіт/с (в залежності від відстані)	11 Мбіт/с
Вих. потуж., дБм	0			0 (клас 1) 4 (клас 2) 20 (клас 3)	0	< 20 (110 Мбіт/с) < 22 (200 Мбіт/с)	20
Відстань, м	10 - 100			10 (клас 3) 100 (клас 1)	5 - 50	10 (110 Мбіт/с) 4 (200 Мбіт/с)	100
Чутливість, дБм	- 92	-85		-70	-75	–	-76
Розмір стека, КБ	4-32			>250	–		>1000
Строк служби батареї, днів	100...1000+			1...7	теоретично більше 1000		0,5...5
Розмір мережі	2 ¹⁶ або 2 ⁶⁴			майстер +7	до 127 на хост		32

Виходячи з наведених характеристик, найближчими конкурентами є технології Bluetooth та ZigBee. Відповідно схожі області їх застосування – безпроводові пристрої домашнього та промислового призначення, включаючи системи дистанційного управління, комп'ютерної периферії тощо. Але на відміну від технології Bluetooth, ZigBee розроблена для додатків, які вимагають низьке енергоспоживання. Періоди активності пристроїв, розроблених по технології ZigBee, можуть бути надзвичайно малими, що забезпечує тривалий строк служби. Крім того, мікросхеми Wi-Fi та Bluetooth надзвичайно дорогі для організації на їх основі великих мереж різноманітних пристроїв в масштабах підприємств. Стандарт 802.15.4 дозволяє розробляти безпроводові інтерфейси з мінімальними витратами, що забезпечується простою схемотехнікою, мінімальною кількістю зовнішніх пасивних компонентів, програмним забезпеченням стеку, який використовує відведений йому об'єм пам'яті з високою ефективністю (табл. 1.1).

Стандарт дозволяє створювати мережі з багатокомірковою технологією, таким чином обслуговуючи надзвичайно велику кількість вузлів і збільшуючи відстань зв'язку без додаткових витрат на підсилювачі потужності.

Технологія ZigBee не призначена для передавання великих об'ємів інформації, як Wi-Fi чи Bluetooth. Але для передавання, наприклад, показів лічильників, датчиків, об'єм яких рідко перевищує десятки байт, не потрібно великих швидкостей – в цьому випадку обов'язкові високі показники по енергозбереженню, ціні та надійності. Більшість пристроїв ZigBee працюють за наступним алгоритмом: пристрій знаходиться в режимі очікування майже весь час, забезпечуючи оптимальний режим енергозбереження; при надходженні нової інформації або під час чергового сеансу зв'язку пристрій активується, швидко передає інформацію і знову переходить в режим енергозбереження. Типові часові затримки при цьому складають 30 мс для підключення нового пристрою до мережі, 15 мс для переходу з режиму очікування в активний стан, 15 мс для доступу до каналу. Так вдається збільшити строк служби батарей до 10 років і більше в залежності від типу додатка і тривалості робочого циклу, при цьому струм при передаванні може складати 15-30 мА, а в режимі очікування – менше 2 мкА. В

результаті, затримки по виклику настільки малі, що людина, яка, наприклад, натискає на вимикач безпроводового зв'язку ZigBee, навіть не помітить, що світло з'являється майже миттєво, в той час як затримки при підключенні пристроїв до мережі Bluetooth складають близько 3 с.

Технологія ZigBee повністю задовольняє всім вимогам для систем дистанційного контролю та управління промисловими об'єктами [3]:

- стабільний надійний двосторонній зв'язок;
- відстань роботи: від 10 м і більше;
- робоча частота в неліцензійному діапазоні;
- малі фізичні розміри;
- виконання на одному кристалі;
- низьке енергоспоживання;
- ціна для кінцевого користувача не більше 5\$.

Крім цього, як видно з табл. 1.1 пристрої ZigBee поєднують найменшу потужність передавачів з найбільшою чутливістю приймачів в порівнянні з іншими конкурентами. Така комбінація дає очевидний позитивний ефект – мінімальне опромінення людей, що знаходяться в зоні обслуговування мережі. Таким чином, ZigBee можна вважати одним з найбільш безпечних та екологічних на сьогодні безпроводових стандартів.

1.1.2 Сфера використання технології ZigBee

ZigBee/802.15.4 є єдиною стандартизованою технологією, початково націленою на системи моніторингу та контролю, розподілені мережі датчиків, на розгортання безпроводових інформаційних мереж для недорогих малопотужних систем, що використовуються в комерційній, промисловій та побутовій автоматизації [5]:

- системи управління освітленням (промислові, муніципальні та домашні);
- промислова та домашня автоматика (опалення, вентиляція і кондиціонування, допоміжні пристрої та обладнання);

- персональна електроніка (мультимедіа, портативні пристрої), побутова техніка (пральні машини, кавоварки, кондиціонери, повітряні фільтри тощо);
- периферійне обладнання ПК: миша, джойстики, клавіатура, ігрові приставки;
- системи сигналізації та безпеки, аварійного оповіщення, системи контролю доступу, безконтактні ключі, датчики диму, газу, руху, полум'я, температури, тиску і т.д.
- пристрої медичної діагностики пацієнта, моніторинг стану спортсменів, біодатчики та медичне обладнання;
- віддалене управління та контроль технологічних процесів, управління рухомими апаратами, верстатами, промисловим обладнанням, холодильними системами, пристроями дистанційного збору даних, телеметрія;
- моніторинг промислових та портових активів, логістика;
- моніторинг систем водо-, газо- та теплопостачання, системи управління та інструментального контролю електроенергії, системи житлово-комунального господарства (ЖКГ).
- безпроводові пристрої обміну інформацією, радіомодеми, передавання аудіосигналу та фотозображень.

Перспективною сферою застосування стандарту є безпроводові системи зчитування показів різних лічильників, оскільки відпадає необхідність щомісяця перевіряти їх. Також технологія надає великі можливості для промислових систем контролю різних процесів.

1.1.3 Основні принципи роботи та елементи мережі ZigBee

Архітектура стеку ZigBee/802.15.4 представлена на рис. 1.3 [2]. Стандарт IEEE 802.15.4 визначає рівень доступу до середовища (MAC) і фізичний рівень передавання даних в середовищі поширення (PHY), тобто нижні рівні протоколу безпроводової передавання даних. Альянс визначає програмні рівні стеку ZigBee від рівня каналу передавання даних (DLC) до рівня профілів пристроїв (ZigBee

Profiles). Прийом та передавання даних по радіоканалу здійснюється на фізичному рівні PHY, який визначає робочий частотний діапазон, тип модуляції, максимальну швидкість, кількість каналів: O-QPSK – квадратурна фазова маніпуляція з зсувом для діапазону 2,4 ГГц (16 каналів, 250 кбіт/с), BPSK – двійкова фазова маніпуляція для частот 915 МГц (10 каналів, 40 кбіт/с) і 868 МГц (1 канал, 20 кбіт/с).

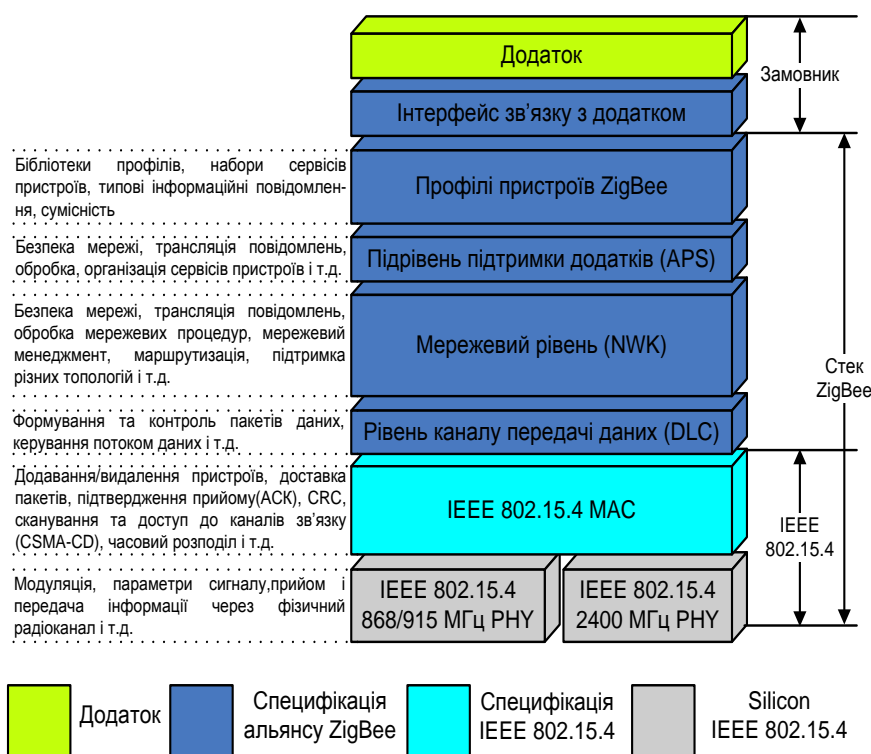


Рисунок 1.3 – Архітектура стеку ZigBee

Рівень PHY здійснює активацію/деактивацію трансивера, детектування енергії сигналу прийому на робочому каналі, вибір фізичного частотного каналу, індикацію якості зв'язку при отриманні пакету даних та оцінку вільного каналу для реалізації протоколу CSMA-CA (протокол множинного доступу до середовища з контролем носійної і запобігання колізій). Стандарт 802.15.4 – це фізичний інтерфейс (мікросхема трансивера), а ZigBee – це логічна мережа та програмний стек, який забезпечує функції безпеки та маршрутизації. Далі в структурі стеку ZigBee йде рівень контролю доступу до середовища MAC (рис. 1.3). Характеристики MAC рівня [2]:

- 64 або 16-бітна адресація в середині локальних мереж. Способи адресації: ідентифікатори: мережевий ID + ID пристрою (топологія “Зірка”); ідентифікатор відправника/отримувача (передавання між рівноправними вузлами);
- вхід в мережу/вихід з мережі, автоматична/напіваавтоматична організація мережі;
- формат пакетів повідомлень мережі ZigBee, максимальне корисне навантаження одного пакету даних складає 104 байта даних, максимальна довжина кадру дорівнює 127 байт;
- рівні безпеки: вільний доступ до мережі; список контролю доступу; таймери визначення затримок при передаванні і актуальність пакетів даних; шифрування з використанням 128-бітного симетричного ключа AES;
- механізм доступу до мережі, функції часового розділу та гарантованих часових інтервалів, доступ до інтервалів шляхом протоколу CSMA-CA;
- підтримка мережевих топологій, включаючи з’єднання типу “точка-точка”, “зірка”, багатокоміркової та кластерної топологій;
- підтвердження про надходження пакету даних, підтвердження прийому (ACK), 16-бітний контроль помилок (CRC);
- підтримка 3 класів пристроїв;
- пакетний/поточковий режими передавання.

Вся мережа ZigBee складається з трьох класів пристроїв: FFD-пристрої-маршрутизатори (Full Function Device – пристрої з повним набором функцій), пристрої-координатори (Coordinators – FFD з додатковими системними ресурсами в залежності від складності мережі) та RFD-кінцеві пристрої (Reduced Function Device – пристрій з обмеженим набором функцій). В кожній локальній мережі ZigBee є лише один пристрій-координатор. Основна задача координатора полягає у встановленні параметрів та створенні мережі, вибір основного радіочастотного каналу, надання унікального мережевого ідентифікатора. При цьому координатор є найбільш складним з трьох типів пристроїв, має найбільший об’єм пам’яті та живиться, як правило від мережі.

Маршрутизатори використовуються для розширення радіусу дії мережі, оскільки здатні виконувати функції ретрансляторів між пристроями, розміщеними далеко один від одного.

Пристрої з обмеженим набором функцій (RFD), які не беруть участь в маршрутизації, не можуть виконувати функції координатора, звертаються лише до координатора локальної мережі (FFD-пристрою), підтримують з'єднання типу “точка-точка” та “зірка”, грають роль кінцевих мережевих вузлів.

На практиці більшість вузлів мережі є RFD-пристроями, а використання FFD-пристроїв та координатора необхідне для утворення мостів зв'язку та відповідної мережевої топології. Як тільки маршрутизатори та інші пристрої підключаються до мережі, вони отримують інформацію про неї від координатора чи будь-якого вже задіяного в мережі маршрутизатора та на основі цієї інформації встановлюють свої операційні параметри у відповідності з характеристиками мережі. Маршрутизатор ZigBee отримує таблицю мережевих адрес, які він розподіляє між підключеними до мережі кінцевими пристроями. Пристрій FFD використовує деревоподібну адресацію при прийнятті рішень про маршрутизацію. Кожний маршрутизатор підтримує таблицю, яка складається з пар типу DN, де D – це адреса цілі, а N – адреса наступного пристрою на шляху до цієї цілі. Приклад мережі ZigBee наведено на рис. 1.4 [2].

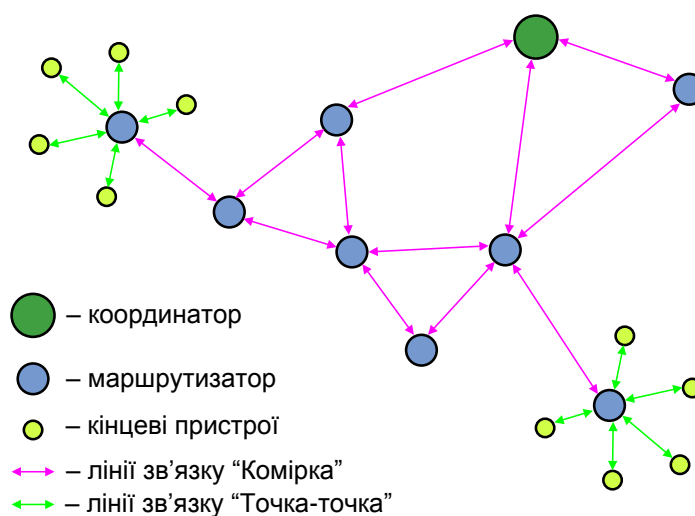


Рисунок 1.4 – Приклад мережі ZigBee з використанням пристроїв всіх 3 класів

Головним завданням мережі ZigBee є оптимізація енергоспоживання. Одним з розв'язків цього завдання є стратегія зв'язку, яка ґрунтується на передаванні даних лише при їх надходженні і наступного очікування підтвердження у випадку успішного прийому пакету з боку адресата. При цьому кожен пристрій може ініціювати передавання в будь-який момент. Очевидним недоліком даного методу є ймовірність інтерференції при одночасному передаванні даних декількома пристроями. Але можливість накладання зводиться до мінімуму завдяки надзвичайно малій тривалості активного циклу пристрою, випадковості моменту передавання і, як правило, невеликим об'ємом інформації, що передається. Надійність з'єднання підвищується за рахунок використання протоколу CSMA-CA.

Стратегія простого множинного доступу використовується тільки для з'єднань типу “точка – точка” або “зірка”. Вона підходить не для всіх додатків. Для запобігання небажаної взаємодії можливе використання протоколу множинного доступу з часовим поділом (TDMA). Технологія Zigbee/802.15.4 гарантує тимчасові інтервали за принципом схожому з технологією TDMA, але використання даного поділу можливе тільки разом з режимом синхронізації й тимчасового поділу, що є більш складним і менш енергоефективним алгоритмом у порівнянні зі звичайним TDMA-доступом. Тимчасовий поділ Zigbee базується на використанні режиму синхронізації, при якому кінцеві мережеві пристрої, більшу частину часу перебувають в стані очікування, періодично активуються для прийому сигналу синхронізації від мережевого координатора, що дозволяє пристроям в середині локальної мережевої комірки знати, в який момент часу здійснювати передавання даних. Координатор керує обміном, виділяє канали й здійснює виклики з інтервалом від 15 мс до 252 с. Передавання сигнальних пакетів визначає пропускну здатність, забезпечує малий час очікування черги доступу й виділення 16 тимчасових інтервалів однакової тривалості, на кожному з яких виключені колізії в мережі (рис. 1.5) [13].

Часовий інтервал доступу для кожного з вузлів мережі визначається або координатором, або за допомогою механізму CSMA-CA. Інтервали спокою необхідні для реалізації енергозберігаючого режиму мережевого координатора при

роботі від автономного джерела живлення. Недолік – стан очікування сигналу синхронізації приводить до незначного збільшення енергоспоживання через наявність невеликих часових розбіжностей, що змушує пристрої активуватися раніше, щоб не пропустити сигнал. Функція синхронізованого доступу застосовується в мережах з розширеною топологією, таких як “кластерне дерево” і “багатокоміркова мережа”. У табл. 1.2 [2] наведена різниця в обміні даними між координатором та вузлом мережі для випадків простого множинного доступу й доступу з функцією синхронізації.

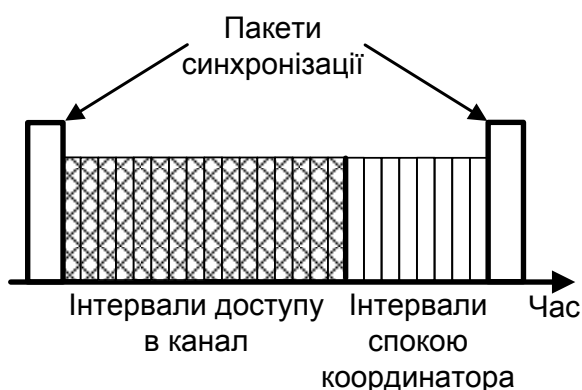


Рисунок 1.5 – Синхронізований доступ в мережу ZigBee

Стандартний множинний доступ може мати місце в системах безпеки й охорони при організації Zigbee-мережі різноманітних датчиків (проникнення, руху, диму і т.д.). Умовами застосування можна вважати загальний час стану спокою систем порядку 99,9%, перехід пристроїв в активний стан у псевдовипадкові моменти часу для повідомлення координатору про свою присутність у мережі. У момент спрацювання датчик відразу переходить в активний стан і передає сигнал тривоги. При цьому координатор, що працює від мережі живлення, постійно перебуває в активному стані й приймає сигнали від усіх кінцевих мережевих пристроїв.

Синхронізований доступ дозволяє координатору мати автономне живлення завдяки відсутності випадкових пакетів від кінцевих пристроїв. Реєстрація в мережі в цьому випадку відбувається в такий спосіб:

- кінцевий пристрій відразу після ввімкнення живлення очікує сигнал синхронізації від координатора існуючої мережі Zigbee (часовий інтервал очікування сигналу 0,015...252 с);
- обмін первинною інформацією з координатором і очікування відповіді;
- перехід у стан спокою, активація у моменти, обумовлені координатором мережі Zigbee;
- по закінченню сеансу зв'язку з кінцевим пристроєм координатор також переходить у стан спокою.

Таблиця 1.2 – Протоколи обміну даними для двох стратегій доступу в мережу

Напрямок передавання даних	Синхронізований доступ	Простий множинний доступ
До координатора	Пристрій чекає сигнальний пакет. Пристрій синхронізується з мережею. Пристрій передає пакет даних в визначений часовий інтервал згідно з протоколом CSMA-CA. Координатор передає підтвердження прийому даних.	Пристрій передає пакет по мірі появи даних згідно з CSMA-CA. Координатор передає підтвердження прийому даних.
Від координатора	Під час сигнального пакету координатор повідомляє про наявність нових даних. Пристрій чекає сигнальний пакет. Якщо є нові дані, пристрій запитує дані в певний часовий інтервал згідно з протоколом CSMA-CA. Координатор передає підтвердження отримання запиту від пристрою. Координатор передає дані в певний момент часу згідно з протоколом CSMA-CA	Координатор зберігає дані, поки не надійде на них запит від пристрою. Пристрій надсилає запит координатору згідно протоколу CSMA-CA. Координатор передає підтвердження отримання запиту від пристрою. Координатор пересилає дані згідно з протоколом CSMA-CA.

Мережі PAN з синхронізацією використовують доменний механізм доступу до каналу CSMA-CA, де домени затримки припадають на початок передавання пакету синхронізації. Домени затримки всіх пристроїв у межах PAN регулюються

координатором PAN. Щоразу, коли пристрою потрібно передати кадр даних під час інтервалу доступу в канал (рис. 1.5), він визначає границю наступного домену затримки й потім чекає довільну кількість доменів затримки. Якщо канал зайнятий, виникає чергова затримка, пристрій знову чекає випадкову кількість доменів затримки, перш ніж знову спробує здійснити доступ до каналу. Якщо канал пасивний, пристрій починає передавання. Кадри підтвердження посилаються без використання механізму CSMA-CA.

Успішний прийом та верифікація кадрів даних може бути підтверджена відправленням пакетів підтвердження. Якщо пристрій з якої-небудь причини не може обробити вхідний кадр, одержане повідомлення не підтверджується.

Якщо відправник протягом певного часу не одержує підтвердження, він вважає, що передавання не вдалося й намагається повторити передавання кадра. Якщо підтвердження не приходить після декількох спроб передавання, відправник може або завершити сесію, або спробувати ще раз. Коли підтвердження не потрібно, відправник вважає передавання успішним.

1.2 Компоненти мережі ZigBee

1.2.1 Датчики та способи їх об'єднання для передавання інформації

Оскільки мережі ZigBee в даній роботі використовується для управління та контролю багатьох фізичних параметрів навколишнього середовища (температура, вологість повітря, датчики руху, освітлення тощо), то в даному розділі наведено огляд основних характеристик датчиків, які можуть бути використанні в мережах ZigBee.

Всі датчики сьогодні поділяються на аналогові та цифрові. Принципової різниці між ними немає, оскільки в будь-якому випадку сигнал з аналогового датчика перетворюється в цифровий. Відмінність полягає в тому, що в цифровому датчику інтегровано ще електронну схему підсилення, фільтрації та оцифровки аналогового сигналу. Перевагою цифрових датчиків є просте діагностування та

калібрування. Аналогові датчики, як правило, мають вищу надійність, меншу вартість та вищу стандартизацію.

В свою чергу більшість цифрових датчиків для обміну даними з мікроконтролером використовують або інтерфейс I2C, або SPI. Інтерфейс SPI більш швидкісний, ніж I2C (хоча в даному випадку це немає значення), але потребує більшу кількість ліній (3 або 4) на відміну від I2C (2 лінії), крім цього I2C в переважній більшості використовується тоді, коли кількість пристроїв, які приєднуються до мікроконтролера велика. В даному розділі наводяться таблиці, в яких буде запропоновано для кожного типу датчиків 3 види комунікацій з МК (аналоговий, цифровий: I2C або SPI).

Для контролю температури навколишнього середовища чи корпусу пристроїв, як правило, використовують напівпровідникові датчики температури. Фізичний принцип роботи їх полягає в тому, що змінюється опір напівпровідника при зміні температури. Також можливо використання кремнієвих діодів у якості датчиків температури, оскільки характеристики р-n переходів залежать від температури. Якщо, наприклад, діод в прямому напрямку ввімкнути до джерела струму, то вихідна напруга на ньому буде пропорційна температурі.

В табл. 1.3 наведена порівняльна характеристика датчиків температури та їх опис, а на рис. 1.6 фото деяких датчиків.

Для контролю рівня освітленості в більшості випадках використовують датчики на базі фотодіодів (фототранзисторів) чи фоторезисторів. В першому випадку від рівня освітленості залежить рівень напруги на фотодіоді, в другому – опір датчика. Як правило, сьогодні датчики виконуються у вигляді мікросхеми з буферними підсилювачами та АЦП. Для управління освітленням необхідно використовувати датчики з вузькою спектральною характеристикою з піком біля максимуму чутливості людського ока 550 нм (рис. 1.7). Також дані датчики не повинні залежати від типу джерела освітлення (флюорисцентна лампа, лампа розжарення, галогенна лампа, сонячне освітлення тощо).

Таблиця 1.3 – Порівняння датчиків температури по основним характеристикам

Тип датчика, розрядність біт	Інтерфейс зв'язку	Чутливість, мВ/°C	Точність °C	Напруга живлення, В	Струм споживання, мА	Діапазон робочих температур, °C	Примітка
DS600	Аналоговий	6,45	0,5	2,7...5,5	0,14	-40...125	Режим енергозбереження
AD22103	Аналоговий	28	2,5	2,7...3,6	0,5	0...100	Присутній модуль обробки сигналу
AD22100	Аналоговий	22,5	2	4...6,5	0,5	-50...150	Інтегрований формувач вих. сигналу
LM19	Аналоговий	11,7	2,5	2,7...5,5	0,01	-55...130	–
AD7314/10	Цифровий (SPI)	–	2	2,65...5,5	1	-35...85	Режим standby
AD7415/10	Цифровий (I2C)	–	2	2,7...5,5	1,2	-40...125	–
DS7505/12	Цифровий (I2C)	–	0,5	1,7...3,7	0,75	-55...125	Функція термостату
MAX6581/11	Цифровий (I2C)	–	1	3...3,6	0,5	-40...125	8-канальний, сигнал перегріву
MCP9805/10	Цифровий (I2C)	–	3	3...3,6	0,2	-20...125	–
TC74/10	Цифровий (I2C)	–	2	2,7...5,5	0,35	0...125	–

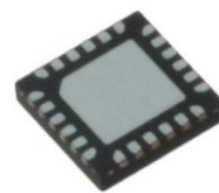
З рисунку видно, що робота пристрою залежить від джерела освітлення при використанні звичайного кремнієвого фотодіоду, в той час як фотодіод HSDL-9100 працює майже однаково при будь-яких джерелах освітлення. Крім цього, цифрові датчики повинні мати широкий динамічний діапазон, оскільки рівень освітлення може змінюватись в значних межах. Порівняння деяких сучасних датчиків освітлення наведено в табл. 1.4, а фото на рис. 1.8.



AD22100



AD22103



MAX6581

Рисунок 1.6 – Фото датчиків температури

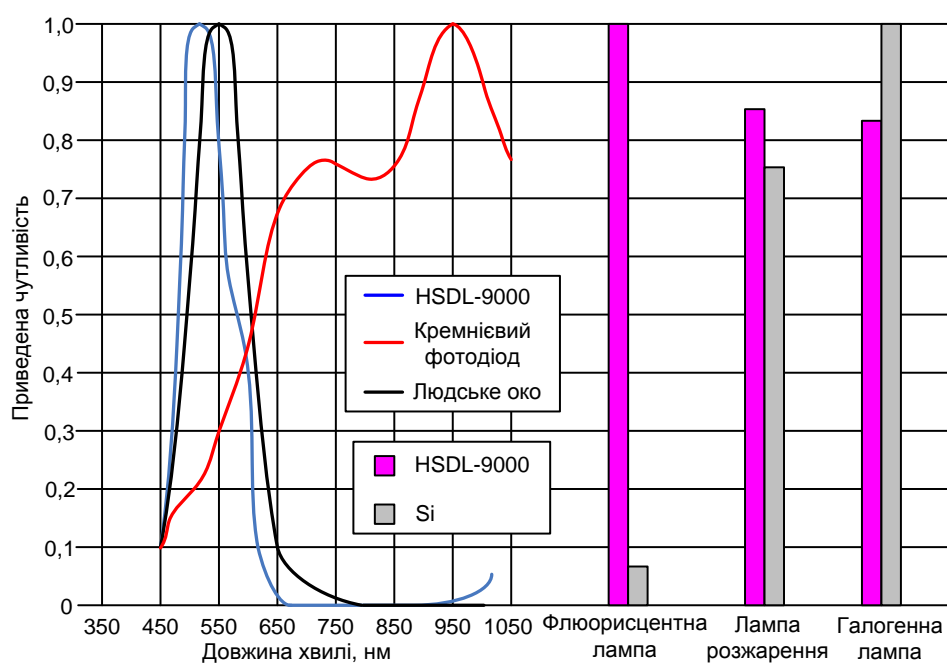


Рисунок 1.7 – Спектральні характеристики людського ока з сучасним датчиком та класичним фотодіодом, залежність фотоструму датчиків від джерел світла

Таблиця 1.4 – Порівняння датчиків освітленості по основним характеристикам

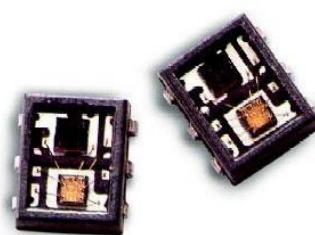
Назва	Пік чутливості λ_p , нм	Струм сигналу, мкА	Темновий струм, нА	Напруга живлення, В	Примітка
MAX9635	188	–	–	1,7...3,6	Шина I2C, 22 біт
APDS-9008	565	28...52	300	1,6...5,5	Аналоговий вихід
APDS-9300	640	-500...500	–	2,4...3,3	Шина I2C, 16 біт
HSDL-9000	550	–	–	2.7...3.6	Вбудований АЦП
APDS-9002	550	136...410	50	2,4...5,5	–



APDS-9008



APDS-9002



HSDL_9000

Рисунок 1.7 – Фото датчиків освітлення

Для вимірювання вологості повітря та середовища використовують ємнісні та резистивні датчики. В першому випадку принцип роботи датчика полягає в залежності діелектричної проникності повітря від кількості вологи в атмосфері, в другому випадку – залежність опору неметалевих провідників від кількості води в них. Оптимальним способом вимірювання вологості є ємнісний метод. Він забезпечує широкий діапазон вимірювань, високу надійність та низьку вартість при використанні мікроелектронної технології. Сучасні датчики вологості також включають в себе датчик температури для компенсації характеристики перетворення (у випадку, якщо вологість треба вимірювати в широкому діапазоні температур).

Лідер по виробництву ємнісних датчиків вологості є датчики Honeywell. Їх перевага – наявність вбудованої інтегральної схеми обробки сигналу, підсилений лінійний вихідний сигнал, можливість прямого підключення до АЦП (вихідний сигнал напруга). В табл. 1.5 наведені основні характеристики датчиків вологості.

Для вимірювання вологості матеріалів (наприклад, ґрунту) використовується теж ємнісний метод, але з використанням генератора ВЧ-коливань (рис. 1.8). Між двома пластинами, які формують конденсатор, розміщується потрібний матеріал. В залежності від діелектричної проникності матеріалу змінюється частота сигналу генератора. Лічильник вимірює частоту, за якою і визначається величина вологості. Для зменшення впливу таких параметрів оточуючого середовища, як температура та атмосферна вологість, рекомендується використовувати диференційні датчики. В цьому випадку визначається різниця частот $\Delta f = f_0 - f_1$, де f_0 – частота, виміряна без матеріалу, а f_1 – частота, виміряна з матеріалом. Недоліком методу є висока неточність при малій вологості, геометрія зразку не повинна змінюватись при вимірюванні.

Таблиця 1.5 – Порівняння датчиків вологості по основним характеристикам

Назва	Час відгуку, с	Вбудований датчик температури	Зовнішній вигляд
НІН-3602-А	50	100 кОм, NTC	
НІН-3602-С	50	1 кОм, платиновий	
НІН-4000-001	15	–	
НСН-1000 (немає схеми обробки сигналу)	15	–	



Рисунок 1.8 – Ємнісно-частотна схема вимірювання вологості матеріалу

Для охоронної сигналізації широко використовуються датчики руху. Принцип роботи ґрунтується на визначенні рівня інфрачервоного випромінювання в полі зору датчика (як правило, піроелектричного). Сигнал на виході датчика монотонно залежить від рівня ІЧ-випромінювання, усередненого по полю зору датчика. З появою людини (або іншого масивного об'єкта з температурою більшою, ніж температура тіла) на виході піроелектричного датчика підвищується напруга. Для того щоб визначити, чи рухається об'єкт, у датчику використовується оптична система – лінза Френеля. Іноді замість лінзи Френеля використовується система ввігнутих сегментних дзеркал. Сегменти оптичної системи (лінзи або дзеркала) фокусують ІЧ-випромінювання на піроелементі, який видає при цьому імпульс. По мірі переміщення джерела ІЧ-випромінювання, воно вловлюється й фокусується різними сегментами оптичної системи, що формує кілька послідовних імпульсів. Залежно від встановленої чутливості датчика, для видачі підсумкового сигналу на піроелемент датчика повинно надійти 2 або 3 імпульси. Фото деяких датчиків руху наведено на рис. 1.9.



Рисунок 1.9 – Приклади датчиків руху

В пожежній безпеці також широко використовують датчики диму та полум'я. Більшість з них реагують або на підвищення температури, або на зміну прозорості між парою світлодіод та фотодіод. При наявності диму в оптичній камері світло розсіюється й попадає на фотодіод, що виробляє вихідний струм. Звичайно цей струм перетворюється в напругу за допомогою підсилювача зі струмовим входом, який складається з одного або двох операційних підсилювачів. Датчики полум'я

можуть реагувати на спектр електромагнітного випромінювання вогню, тліючого вогнища.

Для об'єднання декількох датчиків і подальшого передавання інформації на МК використовуються шини SPI та I2C.

SPI – шина для підключення зовнішніх пристроїв, організована по принципу “ведучий – підлеглий”. У якості ведучого шини звичайно виступає мікроконтролер, але їм також може бути програмуюча логіка, DSP-контролер або спеціалізована мікросхема. Підключені до ведучого шини зовнішні пристрої створюють підлеглих шини. У їхній ролі виступають різного роду мікросхеми, у т.ч. запам'ятовуючі пристрої (EEPROM, Flash-Пам'ять, SRAM), годинники реального часу (RTC), АЦП/ЦАП, цифрові потенціометри, спеціалізовані контролери та ін.

Головним блоком інтерфейсу SPI є звичайний регістр зсуву, сигнали синхронізації і вводу/виводу бітового потоку якого й утворюють інтерфейсні сигнали. Таким чином, протокол SPI є протоколом обміну даними між двома регістрами зсуву, кожний з яких одночасно виконує й функцію приймача, і функцію передавача. Неодмінною умовою передавання даних по шині SPI є генерація сигналу синхронізації шини. Цей сигнал має право генерувати лише ведучий шини й від цього сигналу повністю залежить робота підлеглої шини.

Існує три типи підключення до шини SPI, у кожному з яких беруть участь чотири сигнали. Мінімальна архітектура зображена на рис. 1.10 [19]. Інтерфейс SPI містить чотири лінії:

- MOSI (Master Out Slave In) – вихід даних ведучого (вона ж вхід даних підлеглої);
- MISO (Master In Slave Out) – вхід даних ведучого (вона ж вихід даних підлеглої);
- SCK (Serial Clock) – синхронізація;
- SS (Slave Select) – вибір підлеглої.

Тут, ведучий шини передає дані по лінії MOSI синхронно із сгенерованим їм же сигналом SCLK, а підлеглий захоплює передані біти даних по певних фронтах прийнятого сигналу синхронізації. Одночасно із цим підлеглий відправляє свою

посилку даних. Представлену схему можна спростити виключенням лінії MISO, якщо підлегла IC не передбачає відповідне передавання даних або в ній немає потреби. Одностороннє передавання даних можна зустріти в таких мікросхемах як ЦАП, цифрові потенціометри, драйвери. Таким чином, розглянутий варіант підключення підлеглої IC вимагає 3 або 4 лінії зв'язку. Щоб підлегла IC приймала та передавала дані, крім наявності сигналу синхронізації, необхідно також, щоб лінія SS була переведена в стан логічного нуля. В іншому випадку підлегла IC буде неактивна.

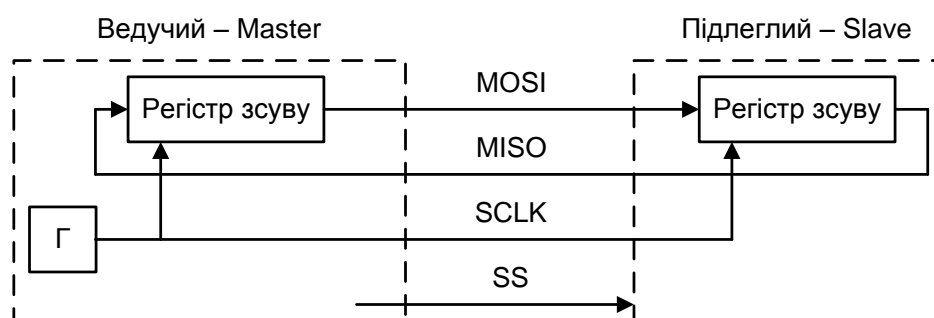


Рисунок 1.10 – Структура зв'язків та ліній інтерфейсу SPI

При необхідності підключення до шини SPI декількох мікросхем використовується або незалежне (паралельне) підключення (рис. 1.11) [18], або каскадне (послідовне) (рис. 1.12) [18]. Незалежне підключення більш розповсюджене, тому що досягається при використанні будь-яких SPI-сумісних мікросхем. Тут, всі сигнали, крім вибору мікросхем, з'єднані паралельно, а ведучий шини, перемиканням того або іншого сигналу SS у низький стан задає, з якою підлеглою IC він буде обмінюватися даними. Головним недоліком такого підключення є необхідність у додаткових лініях для адресації підлеглих мікросхем (загальне число ліній зв'язку дорівнює $3 + n$, де n – кількість підлеглих мікросхем). Каскадне включення не має цього недоліку, тому що тут з декількох мікросхем утворюється один великий регістр зсуву. Для цього вихід передавання даних однієї IC з'єднується із входом прийому даних іншої, як показано на рис. 1.12. Входи вибору мікросхем тут з'єднані паралельно й, таким чином, загальне число ліній

зв'язку дорівнює 4. Але використання каскадного підключення можливе тільки в тому випадку, якщо його підтримка зазначена в документації на мікросхеми, що використовуються.

Протокол передавання по інтерфейсу SPI ідентичний логіці роботи регістру зсуву, яка полягає у виконанні операції зсуву та, відповідно, побітового вводу і виводу даних по певних перепадах (фронт, спад) сигналу синхронізації. Встановлення даних при передаванні та вибірка при прийомі завжди виконуються по протилежних перепадах сигналу синхронізації. Це необхідно для гарантованої вибірки даних після надійного їхнього встановлення. Якщо до цього врахувати, що в якості першого сигналу в циклі передавання може виступати фронт або спад, то всього можливі чотири варіанти логіки роботи інтерфейсу SPI. Ці варіанти одержали назву режимів SPI і описуються двома параметрами:

CPOL – вихідний рівень сигналу синхронізації (якщо CPOL = 0, то лінія синхронізації до початку циклу передавання та після його закінчення має низький рівень (тобто починається фронтом, закінчується спадом), інакше, якщо CPOL = 1, – високий (тобто, починається спадом, закінчується фронтом)).

CPHA – фаза синхронізації; від цього параметра залежить, у якій послідовності виконується встановлення та вибірка даних (якщо CPHA = 0, то по фронті в циклі синхронізації буде виконуватися вибірка даних, а потім, по спаду, – встановлення даних; якщо ж CPHA = 1, то встановлення даних буде виконуватися по фронті в циклі синхронізації, а вибірка – по спаду). Інформацію по режимам SPI узагальнено в табл. 1.6 [18].

Ведуча та підлегла мікросхеми, що працюють у різних режимах SPI, є несумісними, тому, перед вибором підлеглих мікросхем важливо перевірити, які режими підтримуються ведучим шини. Апаратні модулі SPI, інтегровані в мікроконтролери, у більшості випадків підтримують можливість вибору будь-якого режиму SPI і, тому, до них можливе підключення будь-яких підлеглих SPI-мікросхем (відноситься тільки до незалежного варіанта підключення). Крім цього, протокол SPI у кожному з режимів легко реалізується програмно.

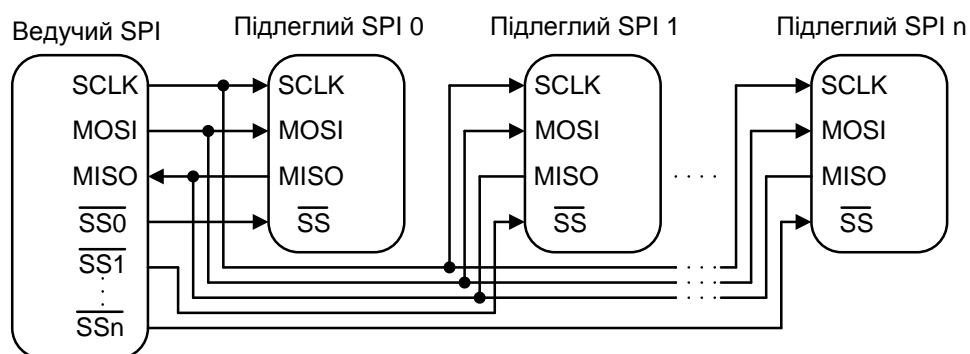


Рисунок 1.11 – Незалежне підключення до шини SPI

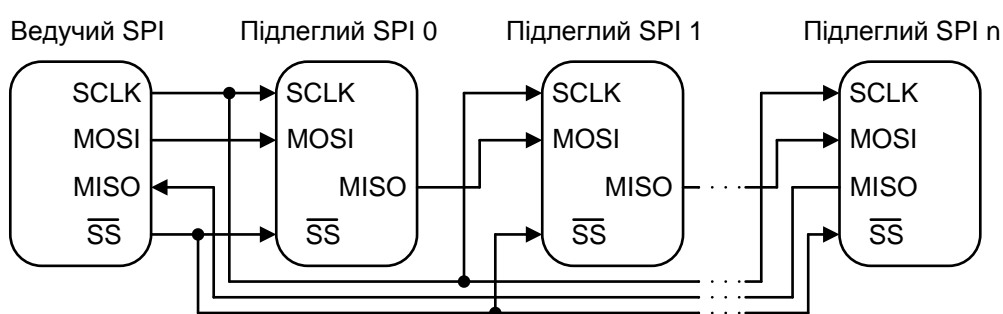


Рисунок 1.12 – Каскадне підключення до шини SPI

I2C або ІІС (Inter-Integrated Circuit) – послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем, розроблена фірмою Philips як проста шина внутрішнього зв'язку для створення електроніки управління. Використовується для з'єднання низькошвидкісних периферійних компонентів з материнською платою, вбудовуваними системами та мобільними телефонами.

I2C шина є однією з модифікацій послідовних протоколів обміну даних. У стандартному режимі забезпечується передавання послідовних 8-бітових даних зі швидкістю до 100 кбіт/с, і до 400 кбіт/с в “швидкому” режимі. Для здійснення процесу обміну інформацією через I2C шину використовується всього два сигнали: лінія даних SDA та лінія синхронізації SCL. Для забезпечення реалізації двонаправленості шини без застосування складних арбітрів вихідні каскади

пристроїв, підключених до шини, мають відкритий сток або відкритий колектор для забезпечення функції монтажного “І”.

Таблиця 1.6 – Режими роботи SPI

Режим SPI	0	1	2	3
CPOL	0	1	0	1
CPHA	0	0	1	1
Часова діаграма першого циклу синхронізації				
	<div>Вибірка</div> <div>Встановлення</div>	<div>Вибірка</div> <div>Встановлення</div>	<div>Вибірка</div> <div>Встановлення</div>	<div>Вибірка</div> <div>Встановлення</div>

Проста двопроводова послідовна шина I2C мінімізує кількість з’єднання між ІС. Відповідно ІС мають менше контактів і потрібно менше доріжок. Інтегрований I2C-протокол не потребує дешифратора адреси та іншої зовнішньої логіки узгодження.

Максимальна допустима кількість мікросхем, приєднаних до однієї шини, обмежується максимальною ємністю шини 400 пФ. До шини може бути підключено до 128 абонентів, кожен зі своїм унікальним номером. У кожний момент часу інформація передається тільки одним абонентом і тільки в один бік.

Пристрої I2C мають вихід з “відкритим колектором”. Коли вихідний транзистор закритий – на відповідній лінії через зовнішній підтягуючий резистор встановлюється високий рівень, коли вихідний транзистор відкритий – він притягує відповідну лінію до землі і на ній встановлюється низький рівень (рис. 1.13) [17]. Резистори мають номінал від кількох кОм до декількох десятків кОм (чим вище швидкість – тим менше номінал резисторів, але більше енергоспоживання). На рис. 1.13 трикутниками на вході показано, що входи високоомні і, відповідно, вони не

впливають на рівні сигналів на лініях, а тільки “зчитують” ці рівні. Зазвичай використовуються рівні 5В або 3,3 В.

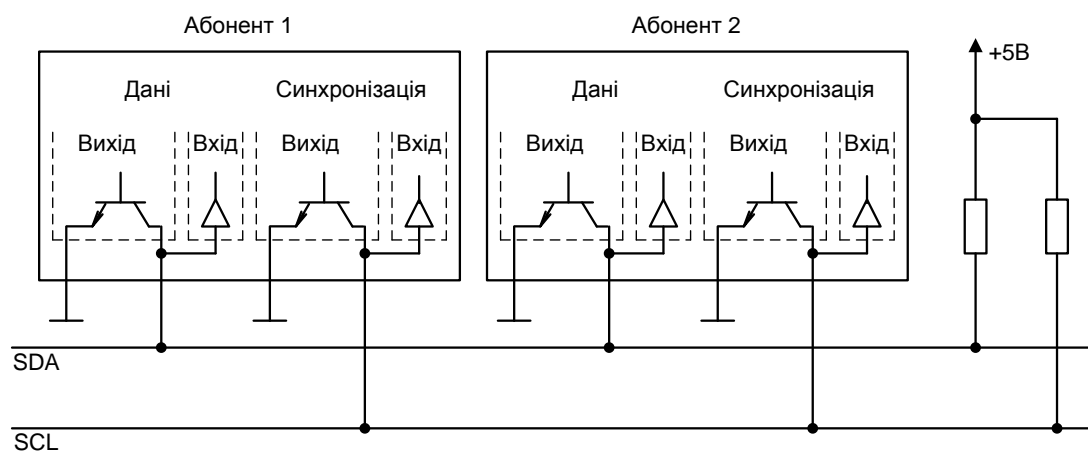


Рисунок 1.13 – Структура шини I2C

Вбудований в мікросхеми апаратний алгоритм завадопритлумлення забезпечує цілісність даних в умовах перешкод значної величини.

Кожен пристрій розпізнається за унікальною адресою і може працювати як передавач або приймач, залежно від призначення пристрою.

Крім цього, пристрої можуть бути класифіковані як ведучі та підлеглі при передаванні даних. Ведучий – це пристрій, який ініціює передавання даних і виробляє сигнали синхронізації. При цьому будь-який пристрій, що адресується, вважається підлеглим по відношенню до ведучого.

Виходячи зі специфікації роботи шини, у кожний окремий момент в шині може бути тільки один ведучий, а саме той пристрій, що забезпечує формування сигналу SCL шини. Ведучий може виступати як в ролі ведучого-передавача, так і ведучого-приймача. Тим не менше – шина дозволяє мати кілька ведучих, накладаючи певні особливості їхньої поведінки у формуванні сигналів управління і контролю стану шини. Можливість підключення більше одного ведучого до шини означає, що більш ніж один ведучий може спробувати почати передавання в один і той же момент часу. Для усунення “зіткнень”, які можуть виникнути в даному

випадку, розроблена процедура арбітражу – поведінки ведучого при виявленні “захоплення” шини іншим ведучим.

Процедура синхронізації двох пристроїв ґрунтується на тому, що всі I2C-пристрої підключаються до шини за правилом монтажного "I". У початковому стані обидва сигнали SDA і SCL знаходяться у високому стані.

Процедура обміну починається з того, що ведучий формує стан СТАРТ – перехід сигналу лінії SDA з високого стану в низьке при високому рівні на лінії SCL. Цей перехід сприймається всіма пристроями, підключеними до шини як ознака початку процедури обміну.

Генерація синхросигналу – це завжди обов’язок ведучого, кожен ведучий генерує свій власний сигнал синхронізації при пересиланні даних по шині.

Процедура обміну завершується тим, що ведучий формує стан СТОП – перехід стану лінії SDA з низького стану у високий при високому стані лінії SCL.

Стани СТАРТ і СТОП завжди генеруються ведучим. Вважається, що шина зайнята після фіксації стану СТАРТ. Шина вважається вільною через деякий час після фіксації стану СТОП. При передаванні даних по шині I2C кожен ведучий генерує свій синхросигнал на лінії SCL. Після формування стану СТАРТ, ведучий опускає стан лінії SCL в низький стан і виставляє на лінію SDA старший біт першого байта повідомлення. Кількість байт в повідомленні не обмежена. Специфікація шини I2C дозволяє зміни на лінії SDA тільки при низькому рівні сигналу на лінії SCL. Дані дійсні і повинні залишатися стабільними тільки під час високого стану синхроімпульсу.

Для підтвердження прийому байта від ведучого-передавача підлеглим - приймачем в специфікації протоколу обміну по шині I2C вводиться спеціальний біт підтвердження, що виставляється на шину SDA після прийому 8 біта даних.

Таким чином, передавання 8 біт даних від передавача до приймача завершуються додатковим циклом (формуванням 9-го тактового імпульсу лінії SCL), при якому приймач виставляє низький рівень сигналу на лінії SDA, як ознаку успішного прийому байта.

Підтвердження при передаванні даних обов'язкове. Відповідний імпульс синхронізації генерується ведучим. Передавач відпускає (високий стан) лінію SDA на час синхроімпульсу підтвердження. Приймач повинен утримувати лінію SDA протягом високого стану синхроімпульсу підтвердження в стабільному низькому стані.

У тому випадку, коли підлеглий-приймач не може підтвердити свою адресу (наприклад, коли він виконує в даний момент будь-які функції), лінія даних повинна бути залишена у високому стані. Після цього ведучий може видати сигнал СТОП для переривання пересилання даних.

Якщо у пересиланні бере участь ведучий-приймач, то він повинен повідомити про закінчення передавання підлеглому-передавачу шляхом непідтвердження останнього байта. Підлеглий-передавач повинен звільнити лінію даних для того, щоб дозволити ведучому видати сигнал СТОП або повторити сигнал СТАРТ. Приклад передавання даних від підлеглого (Slave) до ведучого (Master) наведено на рис. 1.14, а часова діаграма передавання даних на рис. 1.15 [17].

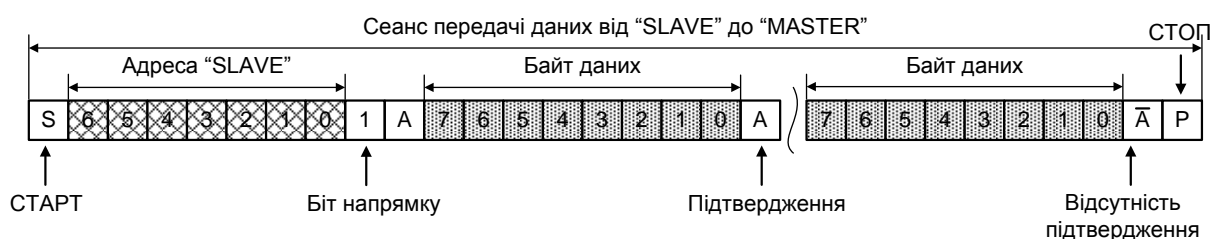


Рисунок 1.14 – Сеанс передавання даних від "SLAVE" до "MASTER"

Синхронізація виконується з використанням підключення до лінії SCL за правилом монтажного "І".

Це означає, що ведучий не має монопольного права на управління переходом лінії SCL з низького стану у високий. У тому випадку, коли підлеглому необхідний додатковий час на обробку прийнятого біта, він має можливість утримувати лінію SCL в низькому стані до моменту готовності до прийому наступного біта. Таким

чином, лінія SCL перебуває в низькому стані протягом найдовшого низького періоду синхросигналів. Швидкість передавання будь-якого ведучого адаптується до швидкості повільного пристрою.

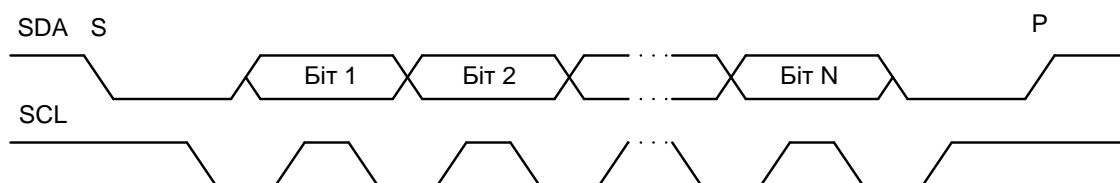


Рисунок 1.15 – Часова діаграма передавання даних по шині I2C

Кожен пристрій, підключений до шини, може бути програмно адресований за унікальною адресою.

Для вибору приймача повідомлення ведучий використовує унікальну адресну компоненту в форматі посилки. При використанні однотипних пристроїв, ІС часто мають додатковий селектор адреси, який може бути реалізований як у вигляді додаткових цифрових входів селектора адреси, так і у вигляді аналогового входу. При цьому адреси таких однотипних пристроїв виявляються рознесені в адресному просторі пристроїв, підключених до шини.

У звичайному режимі використовується 7-бітна адресація.

Процедура адресації на шині I2C полягає в тому, що перший байт після сигналу СТАРТ визначає, який підлеглий адресується ведучим для проведення циклу обміну. Виняток становить адреса “загального виклику”, яка адресує всі пристрої на шині. Коли використовується ця адреса, всі пристрої в теорії повинні послати сигнал підтвердження. Однак, обробка “загального виклику” пристроями на практиці зустрічається рідко.

Перші сім бітів першого байта утворюють адресу підлеглого. Восьмий, молодший біт, визначає напрямок передавання даних. “Нуль” означає, що ведучий буде записувати інформацію в обраного підлеглого. “Одиниця” означає, що ведучий буде зчитувати інформацію з підлеглого.

Після того, як адреса надіслана, кожен пристрій у системі порівнює перші сім біт після сигналу СТАРТ зі своєю адресою. При відповідності пристрій вважає себе обраним як підлеглий-приймач або як підлеглий-передавач, залежно від біта на пряму.

1.2.2 Мікроконтролери додатків

Перед передаванням інформації від датчиків за допомогою протоколу ZigBee необхідно спочатку опитати всі датчики, обробити дані, сформувати необхідний пакет і т.д. Існує два підходи в даному напрямі: використання окремого мікроконтролера додатку та трансивера або ж однокристальна реалізація. В даній роботі використовується перший варіант, що пов'язано з великою кількістю датчиків на один трансивер (однокристальна реалізація доцільна при використанні технології ZigBee в якості простого безпроводового датчика).

В розділі наведені параметри окремого мікроконтролера MSP430F2618 та двох однокристальних CC2430 та JN5148.

Сімейство мікроконтролерів з наднизьким споживанням MSP430 компанії Texas Instruments підходить для застосування в інтелектуальних вимірювальних пристроях і пристроях забезпечення безпеки, завдяки широкому набору аналогової периферії з одного боку, і наднизькою потужністю споживання з іншого боку. Гнучка система синхронізації дозволяє програмно змінювати тактову частоту (максимум до 16 МГц) і надає різні режими зниженого енергоспоживання, час переходу з яких становить менше 1 мкс (для MSP430F2xx, в інших моделей не більш 6 мкс). Ці мікроконтролери ідеально підходять для використання в мережах ZigBee.

MSP430F2618 – 16-розрядний мікроконтролер, що складається з різних периферійних пристроїв, призначених для різноманітних галузей використання. Архітектура, яка включає в себе 5 малопотужних режимів, оптимізована для збільшення строку служби батарей в портативних пристроях. Мікросхема має потужний 16-розрядний RISC-процесор, 16-розрядні регістри, а також

калібрований генератор з цифровим управлінням (DCO), який дозволяє переводити МК з малопотужного режиму в активний за 1 мкс. Серія MSP430F261x також включає вбудовані 16-бітні таймери, швидкий 12-бітний АЦП, компаратор, подвійний 12-бітний ЦАП, чотири універсальні послідовні інтерфейси зв'язку (USCI), DMA та 64 лінії вводу/виводу. Типові сфери використання: сенсорні системи, промислові додатки, мережі ZigBee тощо. Структурна схема мікроконтролера наведена на рис. 1.17, а його фото на рис. 1.16. Основні параметри мікросхеми наведені в табл. 1.7.



Рисунок 1.16 – Мікроконтролер MSP430F2618

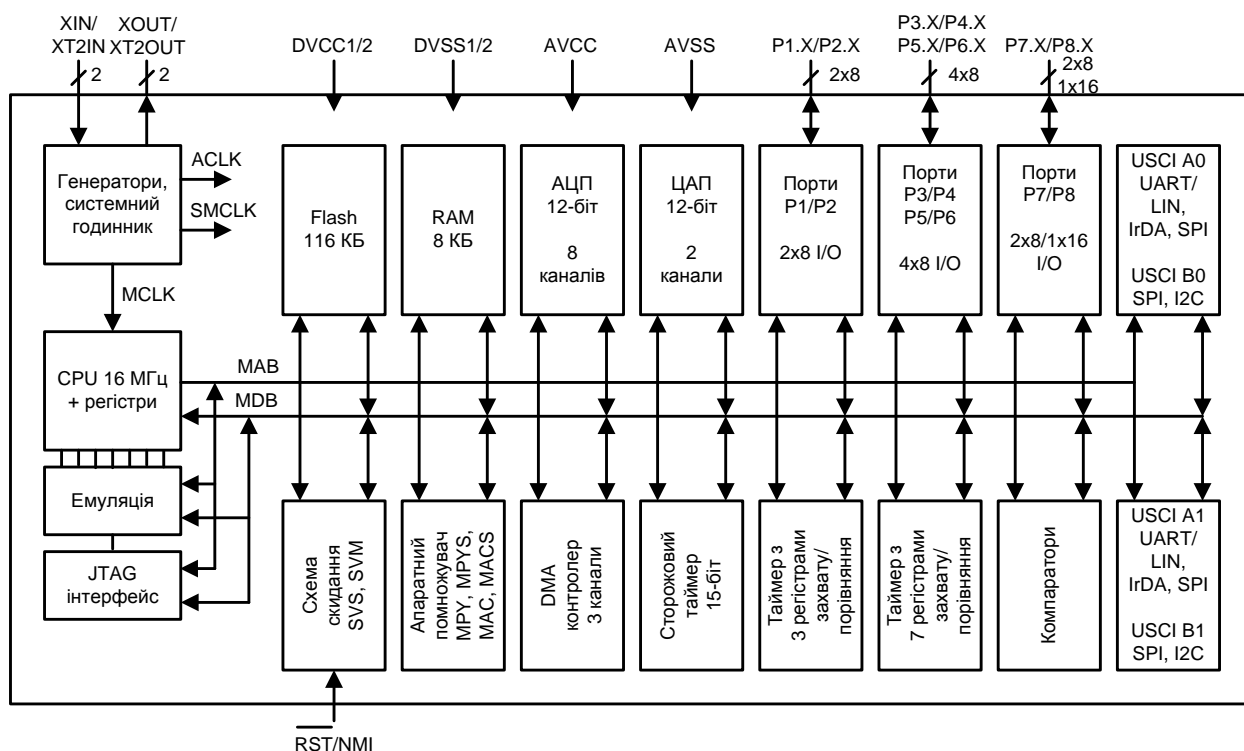


Рисунок 1.17 – Структурна схема мікроконтролера MSP430F2618

Мікросхема JN5148 – це базовий МК, на основі якого виготовляють готові модулі, які відрізняються типом та способом підключення антени. На одному кристалі створено і мікроконтролер, і трансивер.

МК JN5148 орієнтований на роботу з мережевими додатками Zigbee PRO. До його складу входить (рис. 1.18) 32-розрядний RISC-процесор з високою швидкістю, пріоритетною обробкою переривань і програмно-регульованою тактовою частотою 4-32 МГц. В режимі очікування тактова частота процесора може знижуватися до 4 МГц. МК оснащений 128-кбайт ПЗП й 128-кбайт ОЗП. Оскільки стек Zigbee Pro займає не більше 96 КБ, то інша пам'ять може бути використана для запису коду додатку користувача. Використання змінної довжини кодових слів дозволяє підвищити ефективність програмування. Наявність 32-байтного OTP eFuse, що зберігає MAC ID, дозволяє організувати шифрування по стандарту AES. Також МК має трансивер 2,4 ГГц по стандарту IEEE.802.15.4, широкий вибір інтерфейсів для підключення аналогових і цифрових периферійних пристроїв. Завдяки великому обсягу пам'яті додаток користувача обробляється спільно зі стеком Zigbee Pro. Низький струм споживання (18 мА в активному режимі) дозволяє використовувати звичайні літєві елементи живлення.

Таблиця 1.7 – Основні параметри МК MSP430F2618

Ядро	MSP430
Тактова частота, МГц	16
Flash-пам'ять, КБ	116
RAM-пам'ять, КБ	8
Порти I/O, шт.	64
16-бітні таймери, шт.	10
Таймери RTC	немає
Інтерфейси UART/SPI/I2C/LIN/JTAG, шт.	1/2/1/1/1
Кількість каналів/розрядність АЦП	8/12
Кількість каналів/розрядність ЦАП	2/12
Аналоговий компаратор, шт	4
Напруга живлення, В	1,8...3,6
Струм споживання, мА	0,375
Діапазон робочих температур, °C	-40...105

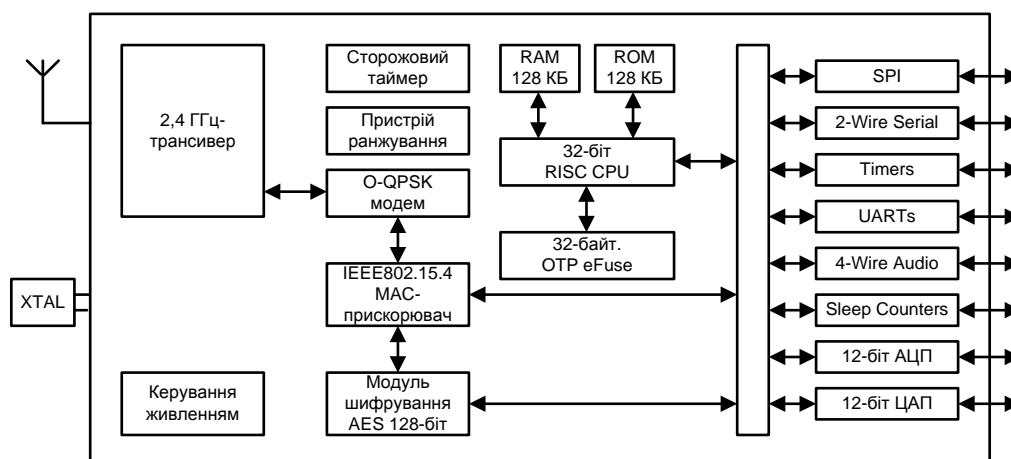



Рисунок 1.18 – Структурна схема мікроконтролера JN5148

Таблиця 1.8 – Основні параметри МК JN5148

Тактова частота, МГц	4...32
Flash-пам'ять, КБ	128
RAM-пам'ять, КБ	128
Порти I/O, шт.	21
16-бітні таймери, шт.	3
Таймери RTC	немає
Інтерфейси UART/SPI/I2C/JTAG, шт.	2/1/1/1
Кількість каналів/розрядність АЦП	4/12
Кількість каналів/розрядність ЦАП	2/11
Аналоговий компаратор, шт	2
Напруга живлення, В	2,2...3,6
Струм споживання, мА	18
Діапазон робочих температур, °C	-40...85
Частота випромінювання, ГГц	2,4
Потужність передавача, дБм	2,5
Чутливість, дБм	-95
Зовнішній вигляд	

МК працює, як правило, в імпульсному режимі з великою шпаруватістю, проводячи більшу частину часу в стані очікування зі струмом споживання близько 1 мкА; тим самим забезпечується більш тривалий термін служби без заміни батареї. В МК є 3 таймера/лічильника для підрахунку імпульсів в додатках, 3 системних

таймера з низьким споживанням, що працюють в режимі очікування, а також сторожовий таймер і схема скидання Power-on-Reset.

Особливості трансивера МК JN5148:

- вбудована система позиціонування, яка по затримках сигналів від суміжних вузлів оцінює своє місце розташування;
- наявність MAC-прискорювача з пакетним форматуванням, CRC, перевіркою адреси і перезапиту при неприпустимій кількості помилок;
- можливість передавання даних на швидкостях 500 і 667 КБ/с;
- вбудований модуль 128-бітного шифрування даних AES;
- режим очікування для економії енергії зі споживанням 0,12 або 1,25 мкА при ввімкненому таймері.

CC2430F32 – малогабаритний однокристальний трансивер на діапазон 2,4 ГГц, призначений для використання в системах стандарту IEEE 802.15.4/Zigbee.

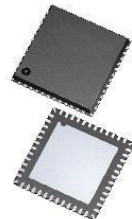
Дана мікросхема побудована на базі Zigbee-трансивера CC2420 об'єднаного з мікроконтролером високої продуктивності (1 команда за 1 такт) на базі 51-ого ядра. Тактова частота мікроконтролера становить 32 МГц. Система на кристалі CC2430 випускається в декількох версіях, що відрізняються обсягом вбудованої Flash пам'яті – від 32 до 128 КБ. Усі варіанти мікросхеми мають 8 КБ оперативної пам'яті з можливістю прямого доступу (DMA), велику кількість таймерів, послідовні інтерфейси, криптопроцесор AES-128, 14-розрядний АЦП, таймер режиму очікування, програмовану лінію вводу/виводу. У комплекті зі стеком протоколів Zigbee мікросхема CC2430 являє собою закінчений модуль для побудови мереж Zigbee. Основні технічні параметри МК наведені в табл. 1.9.

Особливості мікросхеми:

- мале споживання енергії – ідеальний для систем з автономним живленням;
- інструментарій для швидкої розробки прототипів пристроїв;
- Z-Stack – стек протоколів Zigbee;
- статична пам'ять 8 Кб (SRAM) з функцією DMA;
- гнучкі режими енергоспоживання;

- AES-співпроцесор для захисту даних;
- програмований сторожовий таймер;
- генератор випадкових чисел;
- цифрова схема вимірювання рівня сигналу RSSI/LQI;
- цифровий монітор живлення;
- температурний датчик, розміщений на кристалі;
- передбачені засоби для налагодження апаратного забезпечення.

Таблиця 1.9 – Основні параметри МК CC2430F32

Ядро	MCS-51
Тактова частота, МГц	32
Flash-пам'ять, КБ	32/64/128
RAM-пам'ять, КБ	8
Порти I/O, шт.	21
Таймери 8/16-біт, шт.	2/1
Таймери RTC	Так
Інтерфейси UART/SPI, шт.	2/1
Кількість каналів/розрядність АЦП	8/12
Напруга живлення, В	2...3,6
Струм споживання, мА	4,3
Діапазон робочих температур, °C	-40...85
Частота випромінювання, ГГц	2,4
Потужність передавача, дБм	0
Чутливість, дБм	-92
Зовнішній вигляд	

1.2.3 ZigBee-трансивери та способи збільшення відстані зв'язку

Існує також велика кількість мікросхем, які є трансиверами стандарту ZigBee (без функцій мікроконтролера). Розповсюдженими мікросхемами в цій області є CC2420, CC2480, CC2520, CC2530.

В даній роботі в якості трансивера використовується мікросхема CC2520. Це малогабаритний однокристальний трансивер другого покоління для використання в безпроводових мережах стандарту IEEE 802.15.4/ZigBee.



Рисунок 1.19 – Зовнішній вигляд ІМС CC2520

Трансивер CC2520 (рис. 1.19) прийшов на заміну CC2420. CC2520 надає розширену апаратну підтримку для обробки пакетів, буферизацію даних, шифрування та аутентифікацію даних, оцінки рівня шуму в каналі, індикації рівня радіосигналу й тимчасової інформації про пакети. Стабільність роботи мікросхеми в розширеному температурному діапазоні досягається за допомогою вбудованого температурного датчика, значення якого можуть бути зчитані та використані для підстроювання параметрів.

Надійність роботи в умовах складної електромагнітної обстановки гарантується високими показниками притлумлення перешкоди по сусідньому та альтернативному (наступному за сусіднім) каналам.

Основні технічні параметри CC2520 наведені нижче:

- діапазон частот 2,4 ГГц;
- напруга живлення 1,8...3,6 В;
- струм споживання 19-33 мА;
- вихідна потужність -18...+5 дБм;
- чутливість приймача -98 дм;
- висока стійкість до завад по сусідньому каналу;
- відмінний енергетичний потенціал радіоканалу -103 дБ;

- розширений температурний діапазон $-40...125^{\circ}\text{C}$;
- апаратна підтримка функцій IEEE 802.15.4/MAC;
- модуль апаратного кодування AES-128;
- 6 GPIO-портів, 1 SPI-порт.

Переваги:

- дозволяє створювати індустріальні розв'язки в діапазоні 2,4 ГГц;
- здатний працювати в оточенні пристроїв Bluetooth і WiFi;
- апаратні блоки знижують навантаження на зовнішній мікроконтролер.

Застосування:

- промисловий моніторинг і управління;
- автоматизація;
- мережі малопотужних безпроводових датчиків;
- телевізійні приставки та дистанційне управління.

Структурна схема трансивера CC2520 наведена на рис. 1.20 [7].

Мікроконтролер приєднується до трансивера за допомогою інтерфейсів SPI або за допомогою двонаправлених регістрів вводу/виводу (GPIO). Розшифровка інструкцій мікроконтролера здійснюється за допомогою декодера інструкцій. Обробка переривань, які можуть бути викликані інструкціями МК, реалізується контролером переривань.

Модуль оперативної пам'яті (RAM) призначений для тимчасового зберігання даних, а також для організації черг за допомогою алгоритма FIFO. Також МК містить блок шифрування даних AES.

Годинник/RESET генерує внутрішній годинник та скидання сигналів. Радіочастотний блок складається з підмодулів, які підтримують та контролюють аналогові радіомодулі.

Модуль FSM (система з кінцевими станами) використовується для забезпечення правильної послідовності подій (наприклад, підстройка частоти при першому включенні). Крім цього, модуль забезпечує обробку вхідних кадрів через демодулятор: читання кадру, підрахунок кількості отриманих байтів, перевірка

контрольної суми, передавання підтвердження прийому. Такі ж функції модуль виконує і при передаванні даних. Крім цього, даний модуль керує передаванням даних між модулятором/демодулятором та TXFIFO/RXFIFO в RAM.

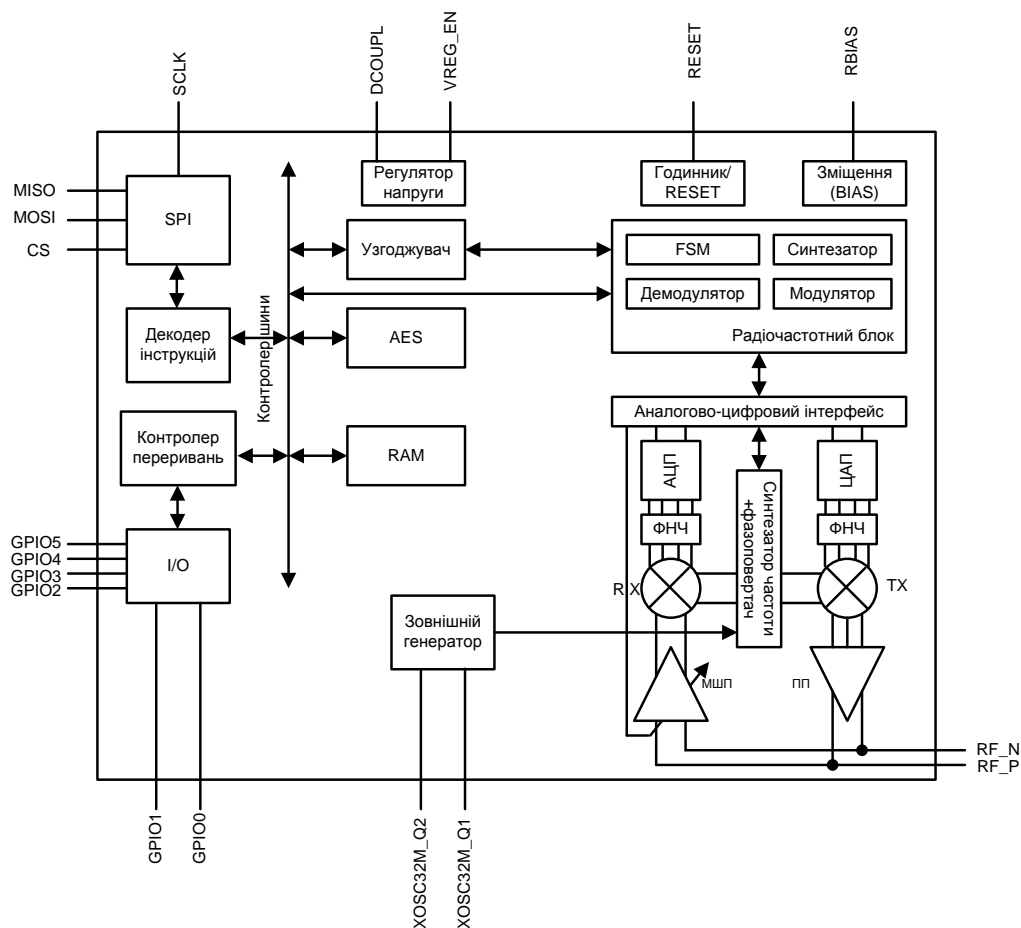


Рисунок 1.20 – Структурна схема трансивера CC2520

Узгоджувач призначений для узгодження цифрових даних згідно з стандартом IEEE 802.15.4.

Передавання та прийом сигналу здійснюється за допомогою модуляції O-QPSK. Для прийому сигналу використовується малошумний підсилювач (МШП), а для підсилення вихідного сигналу підсилювач потужності (ПП). Оскільки радіочастотний тракт аналоговий, то для узгодження цифрових даних з трансивером застосовують АЦП і ЦАП.

Модуляція O-QPSK здійснюється за допомогою синтезатора частоти та відповідних перемножувачів (на кожний канал передавання/прийом по два перемножувача для синфазного та квадратурного сигналів).

За допомогою зміщення (BIAS) можливо регулювати струм споживання МК. Регулятор напруги забезпечує необхідну напругу для мікросхеми.

Ще одним предстаником ZigBee-трансиверів є CC2480. CC2480 є мережевим Zigbee-співпроцесором. Його завдання – передавання даних і підтримка працездатності мережі у взаємодії із зовнішнім мікроконтролером, на якому виконується основний додаток користувача. Основні параметри трансивера наведені в табл. 1.10 [6].

Процесор CC2480 призначений винятково для мережевої взаємодії в Zigbee-мережах, беручи на себе всі критичні за часом завдання й залишаючи вільними для роботи з додатком ресурси зовнішнього мікроконтролера. CC2480 може виступати координатором, роутером або кінцевим вузлом Zigbee-мережі з топологією Mesh.

Таблиця 1.10 – Основні параметри трансивера CC2480

Діапазон частот, МГц	2400...2483
Інтерфейси UART/SPI, шт.	1/1
Порти GPIO, шт.	4
Таймери, шт.	4
Інтерфейси UART/SPI, шт.	2/1
Кількість каналів/розрядність АЦП	2/12
Напруга живлення, В	2...3,6
Струм споживання, мА	4,3...12,3
Діапазон робочих температур, °C	-40...85
Потужність передавача, дБм	0
Чутливість, дБм	-92

Кожна мікросхема CC2480 попередньо програмується унікальною 64-бітним IEEE-адресою. Зовнішній керуючий мікроконтролер передає команди управління по інтерфейсу SPI або UART.

У загальній структурі ПО вузла Zigbee-мережі CC2480 є пристроєм нижнього рівня, який отримує команди та дані від ПО верхнього рівня – додатка користувача,

що виконується на керуючому хост-процесорі. Для взаємодії з CC2480 передбачено два набори команд API – Simpleapi і Z-Stack API.

Типові трансивери ZigBee, як правило, забезпечують зв'язок на відстані до 100 м. Для збільшення відстані є декілька шляхів: збільшення потужності передавача, чутливості приймача, вибір відповідної діаграми направленості (коефіцієнту підсилення) антени. Типовим випадком є підвищення вихідної потужності передавача. Більшість виробників ZigBee-трансиверів вже виготовляють для своїх пристроїв підсилювачі для розширення зони обслуговування. Зокрема для трансиверів CC2420, CC2480, CC2520, CC2530 в якості підсилювача потужності ідеально використати спеціально розроблені для цього мікросхеми CC2590, CC2591.

Обидві мікросхеми містять вбудований малошумний підсилювач і підсилювач потужності. CC2590 має підсилювач потужності, здатний підвищити потужність сигналу до 14 дБм, CC2591 – до 22 дБм. Структурна схема мікросхеми представлена на рис. 1.21 [9].

Як видно з рисунку, в середині паралельно підключені підсилювач потужності з малошумним підсилювачем, які високочастотними ключами поперемінно підключаються внутрішньою логікою до вихідної антени через узгоджуючий трансформатор, який узгоджує вхідний опір підсилювача з вихідним опором трансивера. Застосування в мікросхемах малошумних підсилювачів дозволило на 6 дБ покращити показник чутливості для мікросхем CC24xx і CC25xx. Короткі технічні характеристики мікросхем представлені в табл. 1.11 [9].

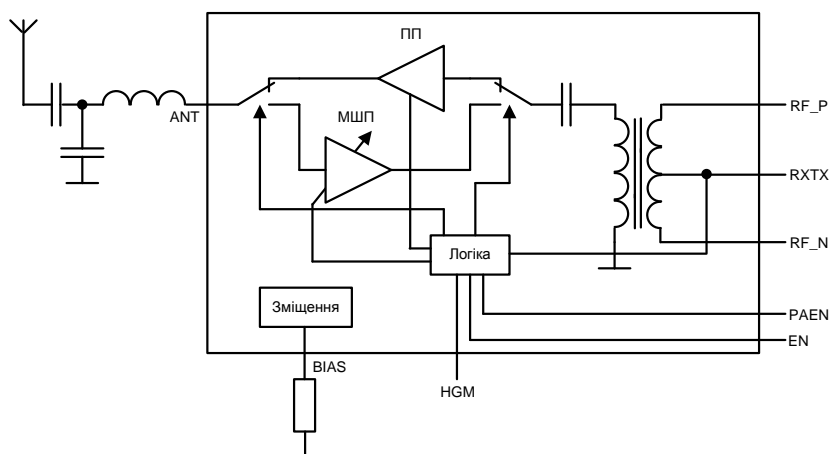



Рисунок 1.21 – Структурна схема підсилювача CC2590

Таблиця 1.11 – Основні параметри підсилювачів CC2590/91

Параметр	CC2590	CC2591
Діапазон, ГГц	2,4	2,4
Максимальна вихідна потужність, дБм	+14	+22
Струм споживання при передаванні (напруга 3 В), мА	22 мА (при вихідній потужності 12 дБм)	112 мА (при вихідній потужності 20 дБм)
Коефіцієнт шуму малошумного підсилювача, дБ	4,6	4,8
Струм споживання при прийомі, мА	3,4 в режимі HIGH 1,7 в режимі LOW	
Струм споживання в режимі очікування, нА	100	
Напруга живлення, В	2...3,6	
Діапазон робочих температур, °C	-40...85	
Зовнішній вигляд		

У серії JN5148 є три типи модулів для збільшення відстані дії модулів ZigBee: JN5148-001-M00 із вбудованою керамічною антеною, JN5148-001-M03 з роз'ємом для підключення антени та JN5148-001-M04 з антенним роз'ємом, підсилювачем потужності та малошумним підсилювачем (LNA) для збільшення відстані дії. Всі

модулі можуть працювати як з мережевим стеком Zigbee PRO, так і з додатками користувача. Струм споживання в режимі очікування (з активним таймером) становить 2,6 мкА. Основні характеристики модулів:

JN5148-001-M00/03:

- відстань зв'язку до 1 км (із зовнішньою антеною);
- потужність передавача TX +2,5 дБм;
- чутливість приймача –95 дБм;
- струм при передаванні TX 15 мА;
- струм при прийомі RX 17,5 мА;
- напруга живлення 2,3...3,6 В.

JN5148-001-M04:

- відстань до 4 км (із зовнішньою антеною);
- потужність передавача TX +20 дБм;
- чутливість приймача – 98 дБм;
- струм споживання при передаванні TX 110 мА;
- струм споживання при прийомі RX 23 мА;
- напруга живлення 2,7...3,6 В.

1.2.4 Виконавчі механізми

В якості виконавчих механізмів в мережах ZigBee для управління інженерними системами промислових об'єктів найчастіше використовують електромеханічні (електронні) замки, системи освітлення (лампи), системи поливу тощо.

Замки з електронним управлінням набули широкого вжитку в сучасних системах контролю доступу. Існує два основні типи таких замків – електромагнітні та електромеханічні замки.

Електромагнітний замок – це соленоїд, на який для утримання дверей постійно необхідно подавати напругу. Відкриття такого замка відбувається або

зняттям напруги або короткочасною подачею протифазної напруги. Встановлюються в місцях, де необхідний постійний двосторонній доступ (вхід – вихід). Перевага таких замків – відсутність механічних складових, які зношуються. Надійні, працюють при будь-якій погоді. Простота управління даними замками робить їх просто незамінними для встановлення в службових приміщеннях, коридорах і т.д, де необхідно забезпечити автоматичне розблокування на випадок аварійних і пожежних ситуацій.

Недоліки – управління лише електричне. У випадку “зависання” керуючого обладнання, відкрити двері можна тільки примусовим зняттям напруги на електромагнітному замку. І останнє – двері можна відкрити приклавши зусилля до полотна дверей (хоча й значні, від 300 до 1000 кг\см²).

Електромеханічні замки можна розбити на два підкласи. Перший – замки засуви, що встановлюються на рамі. Другий – замки, встановлювані на полотні дверей. І ті й інші в робочому стані не вимагають подачі напруги. Відкриття відбувається в момент проходження струму по соленоїду, який пускає в хід механічну частину, що відмикає замок.

Замки – засуви встановлюються на раму дверей. Вони блокують засув звичайного замка, який установлений на двері. Даний тип замків, не пов'язаний з виробником звичайного замка, важливі тільки розміри самого засува замка, а оскільки їх безліч, то завжди можна підібрати відповідний тип і розмір. Як правило, замки-засуви використовуються із замками, у яких внутрішня ручка може безперешкодно розблокувати двері (сховавши внутрішню засувку), а зовнішня ручка відключена від приводу засувки. Даний принцип виключає блокування у випадку відсутності напруги (з кімнати завжди можна вийти) і, при наявності механічного ключа, дозволить аварійно відкрити двері зовні.

Електромеханічні замки більш надійні й практичні у використанні. Складність монтажу даних виробів пов'язана з необхідністю підключення керуючого приводу до замка через поверхню дверей, що відкривається. Приклади замків наведені на рис. 1.22.

В якості виконавчих механізмів для систем освітлення доцільно сьогодні використовувати світлодіодні лампи або лампи денного світла. Вони дозволяють значно економити електроенергію, щоправда лампи денного світла не пристосовані до роботи на вулиці, оскільки не працюють при низьких температурах. При використанні готової системи освітлення цілком підійдуть і звичайні лампи розжарювання.

В інших випадках для управління різних систем, як правило, використовують індивідуальні моторизовані приводи (управління насосами, жалюзі, системами кондиціонування і т.д.). Також є можливість управління системами зрошування, використавши в якості виконавчих механізмів системи поливу, фільтрації, капельного зрошування. В даному випадку за допомогою мережі ZigBee можливо управляти регулятором тиску капельного зрошування, тим самим регулюючи вологість ґрунту. Приклад системи зрошування наведено на рис. 1.23.



Рисунок 1.22 – Приклади електромеханічних замків

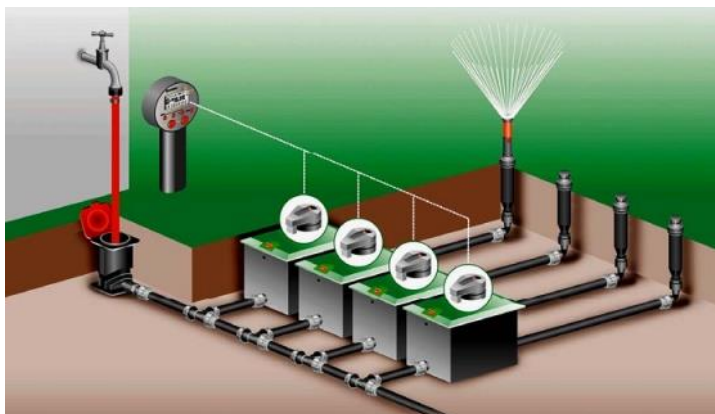


Рисунок 1.23 – Автоматизована система поливу, зрошування ґрунту.

1.3 Огляд основних функцій системи контролю та управління інженерною інфраструктурою промислового об'єкту

Однією з головних інженерних систем будь-якого промислового об'єкту є система освітлення, як в середині, так і зовнішнє вуличне освітлення. За допомогою мережі ZigBee можливо створити коміркову систему освітлення, в якій кожне джерело світла буде зв'язуватись з координатором мережі, як напрямую, так і через проміжні вузли (інші джерела світла). Відстані між вузлами мережі складають десятки метрів в середині приміщення та сотні метрів на відкритому просторі. За рахунок ретрансляцій зона покриття мережі може значно збільшуватись. Приклад коміркової топології для мережі освітлення в середині приміщення наведено на рис. 1.24 [15].

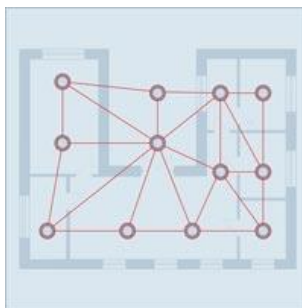


Рисунок 1.24 – Топологія мережі для управління освітленням в середині об'єкту

Основні переваги системи освітлення на основі мережі ZigBee [15]:

- інтелектуальне управління освітленням;
- можливість регулювання яскравістю світильників від 0 до 100 %;
- можливість підключення зовнішніх датчиків (датчик об'єму, датчик освітленості, датчик звуку);
- можливість планування режимів управління освітленням;
- можливість віддаленого управління по мережі Ethernet;
- можливість програмування модуля через комп'ютер;

- можливість плавного ввімкнення та вимкнення яскравості (режим “світанок-захід”);
- можливість об’єднання світильників у групи;
- перенесення даних з пульта на пульт за допомогою Flash-карти;
- можливість збільшення кількості світильників в заданому проекті;
- відсутність механічних кнопок, все управління сенсорне;
- можливість контролю працездатності світильників (моніторинг);
- зменшення навантаження на мережі живлення за рахунок плавного ввімкнення світильників.

У координатора мережі прописані всі зв’язані в мережу світильники, точніше всі їх керуючі модулі. Кожному світильнику надається мережеве ім’я, що дає можливість управління кожним приладом окремо або розбити їх на групи. Це дає дуже широкі можливості: можна групувати світильники по якому завгодно принципу. Наприклад, зібрати в єдину безпроводову мережу прилади, що освітлюють різні зони або території. Дуже важливо, що конфігурування мережі займає лічені хвилини.

Основу мережі становлять різноманітні датчики, підключені до єдиної шини управління: освітленості, руху, контактні та інші. Завдяки сигналам цих датчиків, система управління “розуміє”, чи досить їй світла на кожній з ділянок. У результаті моментально включаються або гаснуть світильники тієї або іншої групи.

Управління світильниками може здійснюється як оперативно, так і по сценарію, заздалегідь закладеному в координатор (рис. 1.26) [16]. Сценарій може передбачати різні умови, при яких здійснюється та або інша дія. За зміною умов, що впливають на управління світильниками, відповідають різні датчики. Причому кожний з датчиків можна призначити “керуючим” для певної групи світильників.

Розглянемо різні варіанти економічного використання світильників.

Наприклад, датчик освітленості керує яскравістю вуличних світильників (рис. 1.25) [16]. По мірі збільшення освітленості на вулиці в ранкові часи, дана група приладів буде зменшувати яскравість світла доти, поки рівень природного

освітлення досягне нормального значення. У похмурі дні, при поганому природному освітленні світильники в міру необхідності будуть підтримувати заданий необхідний мінімум освітленості на вулиці.

Природно можливі будь-які інші варіанти і їх комбінації та підкомбінації сценаріїв, видів датчиків, що впливають на освітлення в різних приміщеннях або на відкритих майданчиках. Гнучкість системи управління дозволяє розв'язати практично будь-які завдання по забезпеченню виконання необхідного сценарію.

Мережі ZigBee також широко використовуються для охоронних систем, пожежної сигналізації, управління електронними замками приміщень.

Використання безпроводових технологій, зокрема технології Zigbee, як основи охоронної системи промислового об'єкту накладає певні вимоги та обмеження. Нижче наведені загальні вимоги до охоронних систем та систем пожежної сигналізації, актуальні в наш час [14]:

- безперервний моніторинг території об'єкта, що охороняється;
- передавання тривожного повідомлення на пост охорони;
- ідентифікація конкретного місця проникнення/загоряння/затоплення/т.д. в приміщенні, що охороняється;
- фіксація інформації на пості охорони;
- можливість автономної роботи від джерела живлення;
- можливість віддаленого управління системою;
- самовідновлення роботи системи при виході з ладу одного або декількох вузлів;
- стійкість до зовнішніх впливів;
- стійкість до впливів перешкод.

Таким чином, з'являються ще додаткові умови [14]:

- більша зона покриття (1200 м² і більше);
- вплив погодних умов на зв'язок між сегментами безпроводової мережі, розташованих у різних будівлях;

- наявність великої кількості перешкод для радіосигналу як в середині приміщення, так і за його межами на території самої ділянки;
- відсутність можливості або висока складність прокладки проводових ліній передавання даних і електроживлення до деяких вузлів мережі.

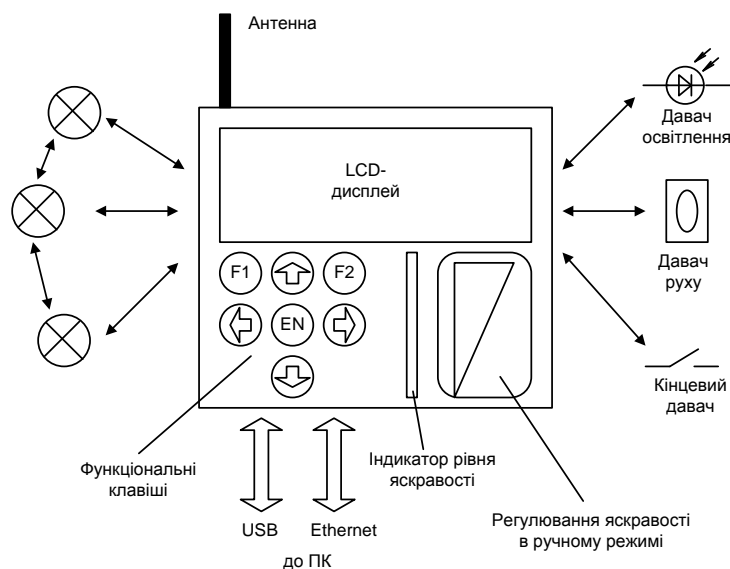


Рисунок 1.26 – ZigBee-координатор для управління вуличним освітленням

При використанні в якості основи для охоронної системи пристроїв Zigbee забезпечується виконання всіх цих вимог.

Необхідність покриття великої площі забезпечується можливостями маршрутизації даних у мережі Zigbee від пристрою до пристрою, а також можливістю застосування антен з більшим коефіцієнтом підсилення, ніж у штатної антени. Ці ж фактори забезпечують можливість безперебійної роботи системи в погану погоду та при наявності різних перешкод для радіосигналу. Але для передавання даних на пост охорони потрібно використовувати інші технології, в зв'язку з значною відстанню між об'єктом та самим постом.

Враховуючи основні вимоги до охоронних систем і особливості розміщення мережі, можна визначити наступний склад безпроводової охоронної системи для промислового об'єкту (рис. 1.27) [14]:

- безпроводові автономні вузли (датчики) – пристрої для збору даних;
- безпроводові автономні маршрутизатори – пристрої, що виконують функцію ретрансляції пакетів з метою передавання їх на необхідний вузол мережі;
- координатор безпроводової мережі – обов’язковий вузол, який створює мережу та керує її роботою. У пам’яті координатора знаходиться таблиця маршрутизації для всієї мережі. До нього підключаються маршрутизатори та кінцеві пристрої, кількість яких можна нарощувати. Координатор передає дані між безпроводовою мережею й термінальною станцією;
- термінальна станція (ПК), призначена для одержання, зберігання та обробки (з наступним передаванням на пост охорони) даних про стан ділянки, що покривається безпроводовою мережею;
- при великій площі ділянки та низькій щільності забудови, коли відстань між об’єктами досить велика (від 50 м і більше), можливе використання різних шлюзів (Zigbee – PLC, Zigbee – Ethernet, Zigbee – Wi-Fi) для об’єднання віддалених один від одного сегментів мережі Zigbee в єдину систему;
- модуль передавання даних на пост охорони;
- джерела автономного живлення вузлів охоронної системи.

Для передавання даних між ПК та постом охорони можна використовувати різні технології. Як правило, це Ethernet, ADSL, GSM, Wi-Fi, WiMAX. Приклади організації передавання даних на пост охорони через Ethernet та ADSL наведені на рис. 1.28 [14]. Проводові технології мають значний недолік: система може бути зламана розривом каналу зв’язку. Безпроводові технології не мають таких вад.

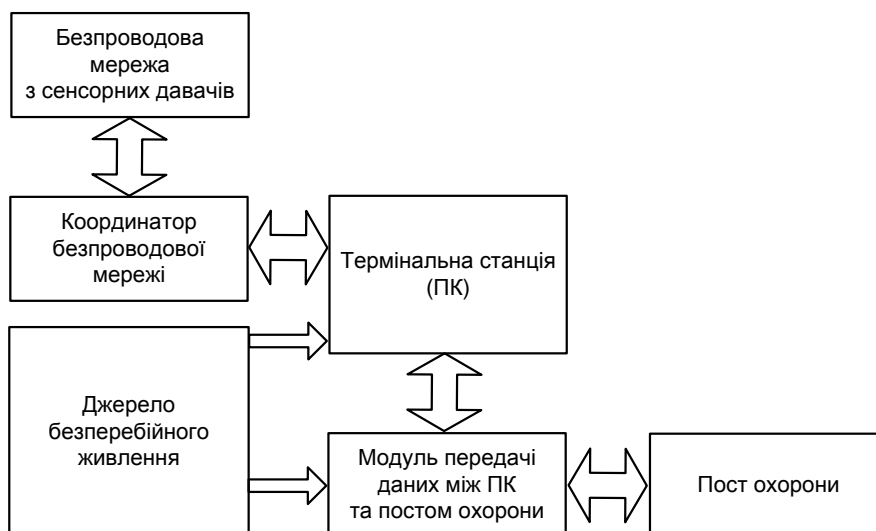


Рисунок 1.27 – Загальна схема охоронної системи та пожежної сигналізації

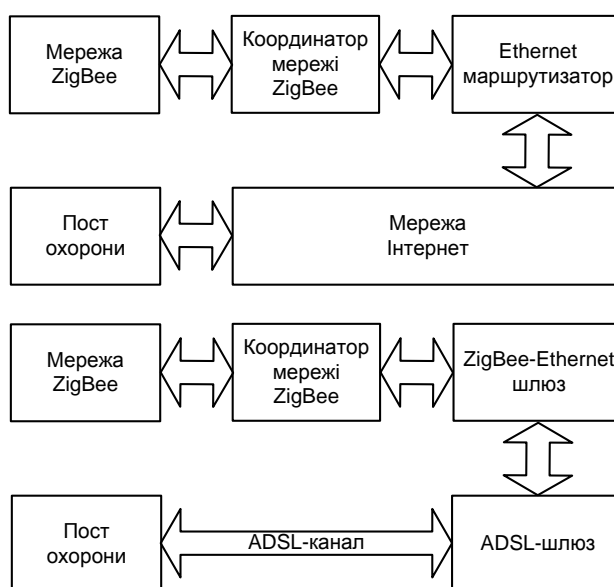


Рисунок 1.28 – Організація передавання даних між мережею ZigBee та постом охорони

У випадку безпроводових технологій організація передавання даних схожа на ADSL. Різниця лише в тому, що замість ADSL-шлюза використовується GSM-модуль чи точка доступу. В останньому випадку навіть не потрібно використовувати термінальну станцію.

Алгоритм роботи безпроводової охоронної системи та пожежної сигналізації на основі Zigbee [14]:

1. Після інсталяції та початкового налаштування координатор мережі через задані проміжки часу передає тестові пакети даних, в яких задано маршрут передавання пакета. Це необхідно для того, щоб виявити непрацездатні вузли мережі. Якщо пакет дійшов до необхідного вузла і на координатор прийшло підтвердження про його успішне передавання, значить всі пристрої, включені в цей шлях, працюють.

2. По запиту з термінальної станції координатор передає на кінцеві пристрої запити на одержання даних від цього пристрою, а потім передає ці дані назад на термінальну станцію.

3. У випадку спрацювання одного або декількох датчиків охоронної системи кінцевий Zigbee-пристрій, до якого цей датчик підключений, передає на вищий маршрутизатор запит на передавання даних. Після підтвердження маршрутизатором готовності прийняти дані від кінцевого пристрою останній передає йому пакети даних.

4. Маршрутизатор, у свою чергу, надсилає ці дані через мережу Zigbee на координатор, який передає дані на термінальну станцію.

5. Диспетчерське ПЗ на термінальному ПК аналізує вміст пакета та відправляє на пост охорони інформацію про те, де і який датчик спрацював.

6. У процесі нормального функціонування мережі (всі вузли справні, немає причин для спрацювання датчиків охорони) диспетчерське ПЗ на термінальному ПК через задані проміжки часу відправляє на пост охорони інформацію про стан безпроводової мережі.

7. У випадку якщо який-небудь пристрій виявляється несправним (див. п. 1) відповідна інформація передається на пост охорони.

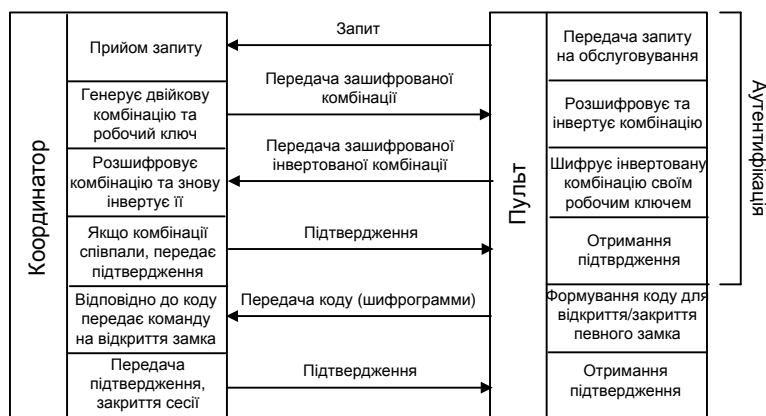
8. З поста охорони або з термінальної станції можна вручну (оператором) робити запити на одержання інформації від певного датчика, підключеного до безпроводової мережі. У цьому випадку координатор надсилає відповідний запит

на кінцевий пристрій безпроводової мережі, який, у вигляді відповіді на запит від координатора, надсилає в мережу необхідні дані.

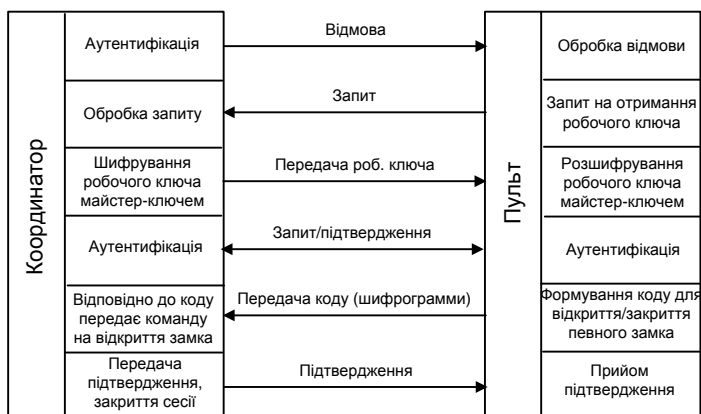
Для управління електронними замками до приміщень промислового об'єкту теж можна використати наведені вище схеми мережі ZigBee (наприклад, рис. 1.4, рис. 1.25). В даному випадку кінцевим пристроєм буде безпроводовий ключ (пульт), за допомогою якого на відстані можна управляти відкриттям/закриттям тих чи інших приміщень. Сигнал від ключа передає пакети через мережу маршрутизаторів (це можуть бути і роутери системи освітлення, охоронної сигналізації і т.д.) на координатор, який в свою чергу видає команду на певний електромеханічний замок. На ключ також можливо передавати інформацію про всі відкриті/закриті двері об'єкту. Але специфікою даної системи є обов'язкове шифрування пакетів даних, які передаються. Пристрої ZigBee підтримують стандарт симетричного алгоритму шифрування AES. Для даних систем доцільно використовувати 128-бітний ключ. Процес передавання даних між пультом та координатором поділяється на 2 етапи: аутентифікація та передавання інформації, який замок відкрити. Для підвищення стійкості системи використовується два ключі: майстер-ключ, який не змінюється, та робочий ключ, який може змінюватись випадково в будь-який момент часу (наприклад, один раз в день, через день і т.д.). Майстер-ключ однаковий в координатора та в пульті управління і завантажується один раз на початку використання системи, робочий ключ генерується координатором. Для аутентифікації координатор створює певну двійкову комбінацію біт та шифрує її робочим ключем. Пульт отримує комбінацію, розшифровує її своїм робочим ключем, потім інвертує її та знову зашифровує робочим ключем і передає координатору. Координатор розшифровує прийняту комбінацію, інвертує біти та порівнює її з початковою. Якщо аутентифікація пройшла, то координатор підтверджує це і починається обмін даними між пультом та координатором, тобто пульт передає кодову комбінацію на відкриття тих чи інших дверей. Весь сеанс зв'язку шифрується робочим ключем. Якщо аутентифікація не пройшла, то це може означати або фальшивий пульт, або ж відсутність у ньому робочого ключа (по замовчуванню робочий ключ, наприклад,

всі одиниці) чи він був змінений координатором. В такому випадку координатор шифрує майстер-ключем згенерований робочий ключ і передає його пульту, який в свою чергу розшифровує його. Потім аутентифікація повторюється. Якщо аутентифікація знову не пройшла, то координатор блокує прийом повідомлень на певний час. Зв'язок між координатором та пристроєм для відкриття дверей теж шифрується алгоритмом AES. Детально всі процеси наведені на схемах (рис. 1.29). Інверсія біт кодової комбінації використовується для виключення передавання відкритого тексту та зашифрованого по каналу зв'язку. Блокування прийому повідомлень не має бути тривалим, оскільки можлива невелика ймовірність спотворення повідомлення перешкодами.

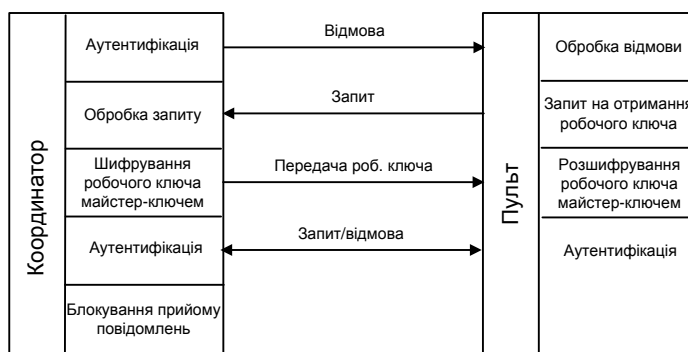
За допомогою мережі ZigBee можливо створити систему управління мікрокліматом. При цьому для кожної групи рослин необхідно поставити у відповідність окремий ZigBee-модуль, який контролюватиме та регулюватиме рівень освітлення, вологість повітря та ґрунту, температуру тощо. Дані від датчиків передаються на контролер, який за певною програмою, відповідно до часу доби, пори року видає параметри, необхідні в даний час для оптимального росту рослин. Виконавчі механізми ZigBee-модуля за допомогою джерел світла, краплинного зрошування, поливу, систем кондиціонування задають необхідний мікроклімат.



а)



б)



в)

Рисунок 1.29 – Обмін повідомленнями між пультом та координатором в системі дистанційного управління замками

а) типовий обмін повідомленнями; б) при зміні робочого ключа;

в) при неправильному майстер-ключі або некоректному прийомі.

Висновки до розділу 1:

В розділі розглянуто мережеву технологію ZigBee та проведено її порівняння з технологіями Wi-Fi та Bluetooth. Wi-Fi та Bluetooth не підходять для реалізації систем моніторингу параметрів середовища промислових об'єктів через свою низьку енергоефективність. Мережева технологія ZigBee дозволяє поєднувати різні види мережевих топологій і при виході зі строю одного із вузлів продовжуватиме функціонувати. Проведено огляд сфер застосування технології ZigBee, основні принципи її роботи та елементи в ній.

Наведено огляд основних датчиків мережі та способи їх об'єднання для передавання інформації. Показані параметри енергоефективного мікроконтролера MSP430F2618. Описано спосіб збільшення відстані зв'язку за допомогою трансиверів та виконавчі механізми мережі ZigBee. Проведено огляд основних функцій системи контролю та управління інженерною інфраструктурою промислового об'єкту.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ СИСТЕМИ

2.1 Вибір робочого частотного діапазону

Пропускна здатність системи напряму залежить від обраного частотного діапазону. Максимальна швидкість передавання, рівна 250 кбіт/с, можлива в діапазоні 2,4 ГГц (16 каналів з кроком 5 МГц). Для частот 868 МГц (1 канал) та 902 – 928 МГц (10 каналів з кроком 2 МГц) швидкості дорівнюють відповідно 20 кбіт/с та 40 кбіт/с (рис. 2.1) [5].

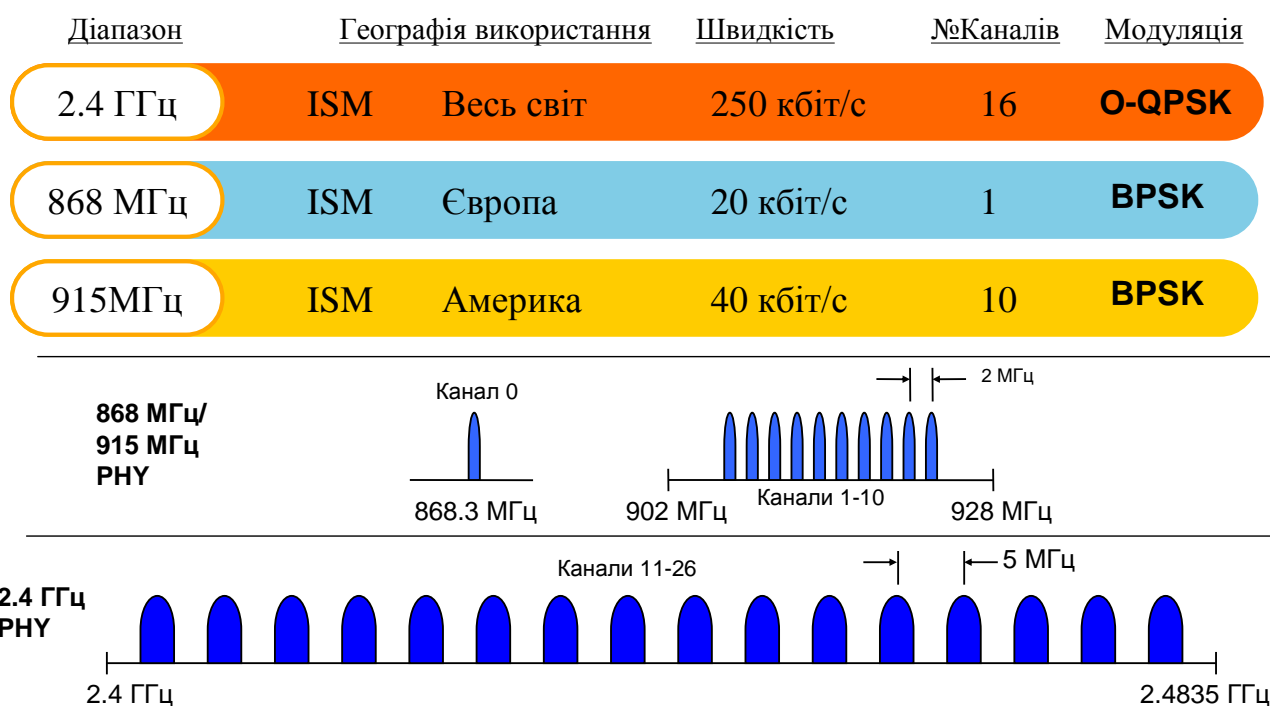


Рисунок 2.1 – Розподіл частотного ресурсу для стандарту ZigBee

Основним діапазонами є 2,4 ГГц та 868 МГц, оскільки діапазон 915 МГц заборонений для використання в даному регіоні. 65...75 % ринку складають 2,4 ГГц мікросхеми. В ньому найбільша кількість каналів та ширша пропускна здатність. Недоліком даного діапазону є насиченість абонентами різного. Перевагою субгігагерцових діапазонів є менший вплив з боку завад та більший радіус дії системи.

Центральні частоти для всіх 27 каналів дорівнюють [13]:

$$f_C = 868,3 \text{ МГц для } k = 0;$$

$$f_C = 906 + 2 \cdot (k - 1) \text{ МГц для } k = 1, 2, \dots, 10;$$

$$f_C = 2405 + 5 \cdot (k - 11) \text{ МГц для } k = 11, 12, \dots, 26.$$

Згідно регіону та широкого розповсюдження мікросхем діапазону 2,4 ГГц для системи, що проектується, обирається діапазон 2,4 ГГц.

2.2 Розрахунок ефективної швидкості та часу передавання даних

В мережі, що розробляється, використовується синхронізований доменний доступ CSMA-CA з використанням кадрів-маяків (рис. 1.5), тому що передбачається, що топологія мережі буде комірковою з використанням роутерів.

Даний стандарт дозволяє використання структури суперкадру. Формат суперкадру визначається координатором. Суперкадр обмежений мережевими маяками (beacon), надісланими координатором (рис. 1.5) і містить 16 рівних по тривалості тимчасових доменів. Суперкадр може мати активну й пасивну секції. У неактивний період координатор переходить в енергозберігаючий режим. Кадр-маяк передається в першому домені кожного суперкадру. Маяки потрібні для синхронізації підключених пристроїв, щоб ідентифікувати PAN, і описати структуру суперкадрів. Будь-який пристрій, що бажає здійснювати обмін у активний період CAP (Contention Access Period) між двома маяками, конкурує за це право з іншими пристроями, що використовують доменний механізм CSMA-CA. Всі обміни завершуються до моменту наступного мережевого маяка.

Перед початком передавання кожний пристрій прослуховує канал і, якщо він вільний, то трансивер робить псевдовипадкову відстрочку передавання даних. Кількість періодів відстрочки (*aUnitBackoffPeriod*) знаходиться в діапазоні від 0 до $2^{BE} - 1$ (BE – показник степені відстрочки, в даному випадку дорівнює 3). Після цього відбувається детектування незайнятості каналу (CCA). У випадку, якщо канал вільний відбувається передавання даних. Якщо канал зайнятий, пристрій знову очікує певний час і намагається отримати доступ до каналу.

В мережі використовується модуляція O-QPSK. 1 символ дорівнює 4 бітам. Тривалість символу 16 мкс. Тривалість періоду відстрочки та час детектування незайнятості каналу дорівнюють [11,12]

$$aUnitBackoffPeriod = 20 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 320 \text{ мкс};$$

$$CCA = 8 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 128 \text{ мкс}.$$

Обчислимо час доступу до каналу (*Channel Access Timing*) у найгіршому випадку (максимальна кількість періодів відстрочки) [11,12]

$$\begin{aligned} Channel\ Access\ Timing &= (2^{BE} - 1) \cdot aUnitBackoffPeriod + CCA = \\ &= (2^3 - 1) \cdot 320 \cdot 10^{-3} + 128 \cdot 10^{-3} = 2368 \cdot 10^{-3} = 2.368 \text{ мс}. \end{aligned}$$

Для розрахунку ефективної швидкості передавання даних необхідно визначити, які службові дані використовуються в протоколі передавання мережі ZigBee та їх об'єм в байтах. Формат кадру фізичного та канального рівнів передавання даних наведені на рис. 2.2 [13].

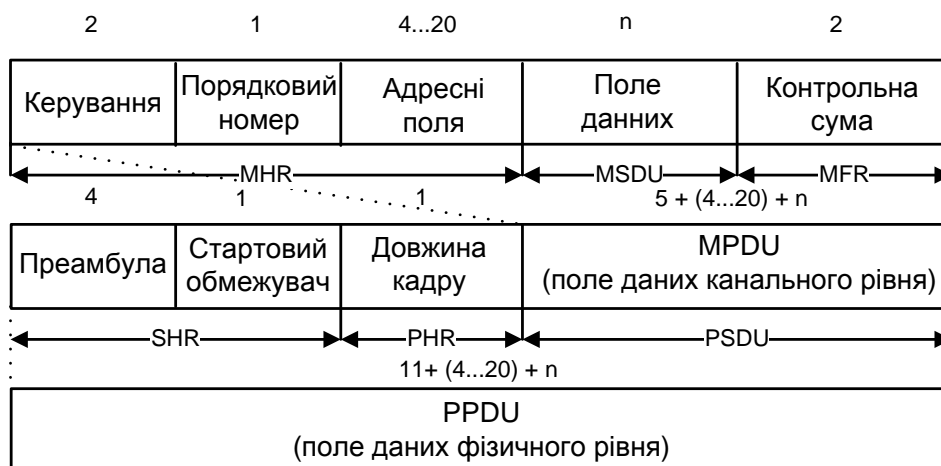


Рисунок 2.2 – Формат кадрів MAC-рівня та фізичного рівня мережі ZigBee

Поле адреси в залежності від типу адресації (64-бітна чи 16-бітна) має зміну довжини. Це поле складається з 4 підполів: ідентифікатор мережі отримувача (Destination PAN ID) – 0 або 2 байти; адреса отримувача (Destination address) – 0, 2, 8 байт; ідентифікатор мережі відправника (Source PAN ID) – 0, 2 байти; адреса відправника (Source address) – 0, 2, 8 байт. Для мережі промислового об'єкту цілком достатньо скороченої 16-бітної (65536 пристроїв) адресації. Тому поле адреси з урахуванням адресації мережі (оскільки можливі інші системи ZigBee на сусідніх об'єктах) дорівнює 8 байт. Максимальна довжина поля $aMaxPHYPacketSize$ (MPDU) дорівнює 127 байт. Отже, довжина поля даних $aMaxMACFrameSize$ (MSDU) дорівнює [11,12]

$$aMaxMACFrameSize = aMaxPHYPacketSize - 13 = 127 - 13 = 114 \text{ байт.}$$

Розрахуємо час передавання фізичного кадру (Data Frame Transfer Time) з урахуванням максимальної швидкості трансивера $250 \cdot 10^3$ біт/с [11,12]

$$DFTT = \frac{(aMaxPHYPacketSize + SHR + PHR) \cdot 8}{250 \cdot 10^3} = \frac{(127 + 5 + 1) \cdot 8}{250 \cdot 10^3} = 4,256 \text{ мс.}$$

Для передавання підтвердження *AT* (*Acknowledgement transmission*) поле MPDU складається з трьох підполів: управління, порядкового номеру та контрольної суми (всього 5 байт). Фізичний кадр відповідно дорівнює 11 байт. Отже, час передавання пакету підтвердження рівний 0,352 мс.

Розрахуємо ефективну швидкість передавання даних з наступними умовами: доступ до каналу здійснюється з 1 разу, без врахування часу обробки даних (для сучасних МК це несуттєво) [11,12]

$$\begin{aligned} \text{Effective data rate} &= \frac{aMaxMACFrameSize \cdot 8}{\text{Channel Access Timing} + DFTT + AT} = \\ &= \frac{114 \cdot 8}{(2,368 + 4,256 + 0,352) \cdot 10^{-3}} \approx 130 \text{ кбіт/с.} \end{aligned}$$

Дана швидкість не враховує ймовірність повторних запитів на передавання, очікування кадру-маяка і т.д., а тому в окремих випадках може бути значно меншою.

Однак цієї швидкості цілком вистачить для передавання даних від різних датчиків. Скажімо, якщо ZigBee модуль має датчик вологості повітря: 0 – 100% (2 байти у форматі ASCII), ґрунту: 0 – 100 % (2 байти у форматі ASCII), температури (3 байти у форматі ASCII: значення та знак) та освітленості: 0 – 1000 лк (3 байти у форматі ASCII). В сумі всього 10 байт (80 біт). В ідеальному випадку час передавання даних без службової інформації дорівнює $80/130 = 0,615$ мс.

Отже, обраний діапазон частот забезпечує належну швидкість передавання даних, яка дозволяє збільшити строк служби батарей автономного живлення та мінімізувати колізії при передаванні даних.

2.3 Вибір топології мережі ZigBee

Стандарт ZigBee передбачає використання наступних топологій мереж: “точка-точка”, “зірка”, “кластерне дерево” та багатокоміркової топології. Приклади цих топологій наведені на рис. 2.3 [10]. Приклад mesh-топології наведено на рис. 1.4.

Топологія “точка-точка” (peer-to-peer – P2P) дозволяє обмінюватись даними з іншим пристроєм в межах радіовидимості. Один з пристроїв є координатором PAN, наприклад, перший, що підключився до каналу. Наступна структура мережі будується згідно з топологією P2P і є можливість введення певних топологічних обмежень. Вона відрізняється від зірки тим, що будь-які мережеві пристрої можуть обмінюватись один з одним, якщо існують відповідні канали. Топологія P2P дозволяє формувати більш складні мережеві конфігурації. Додатки, наприклад, промислового управління та моніторингу, мережі безпроводових сенсорів, інтелектуальне сільське господарство роблять дану технологію вкрай привабливою. Мережа P2P може сама організовуватись та відновлюватись. Ця

топологія дозволяє організувати багатокрокові маршрути доставки повідомлень від одного мережевого пристрою до іншого.

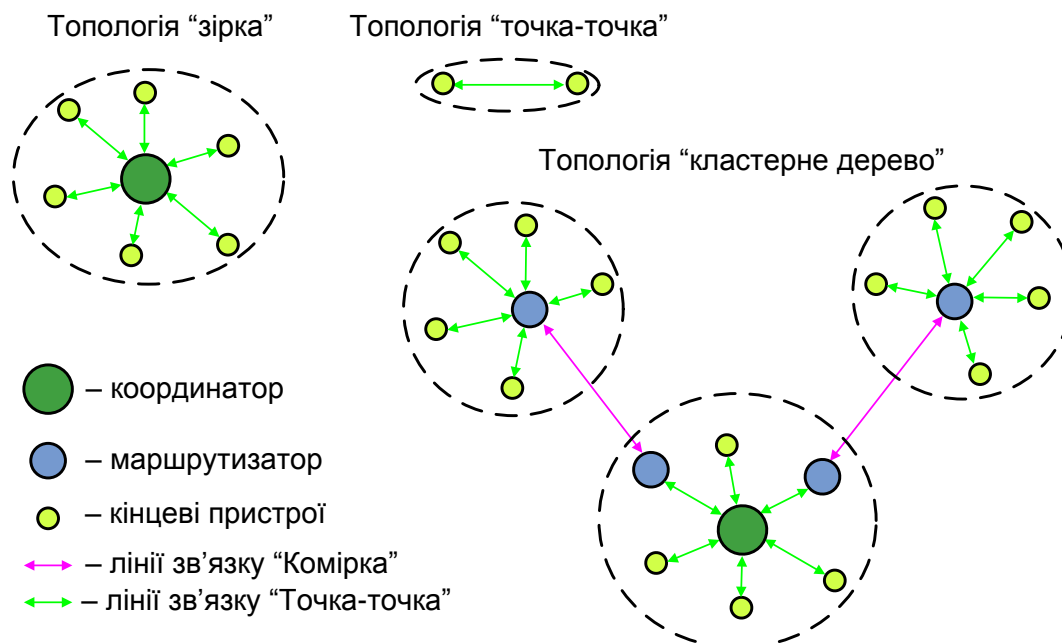
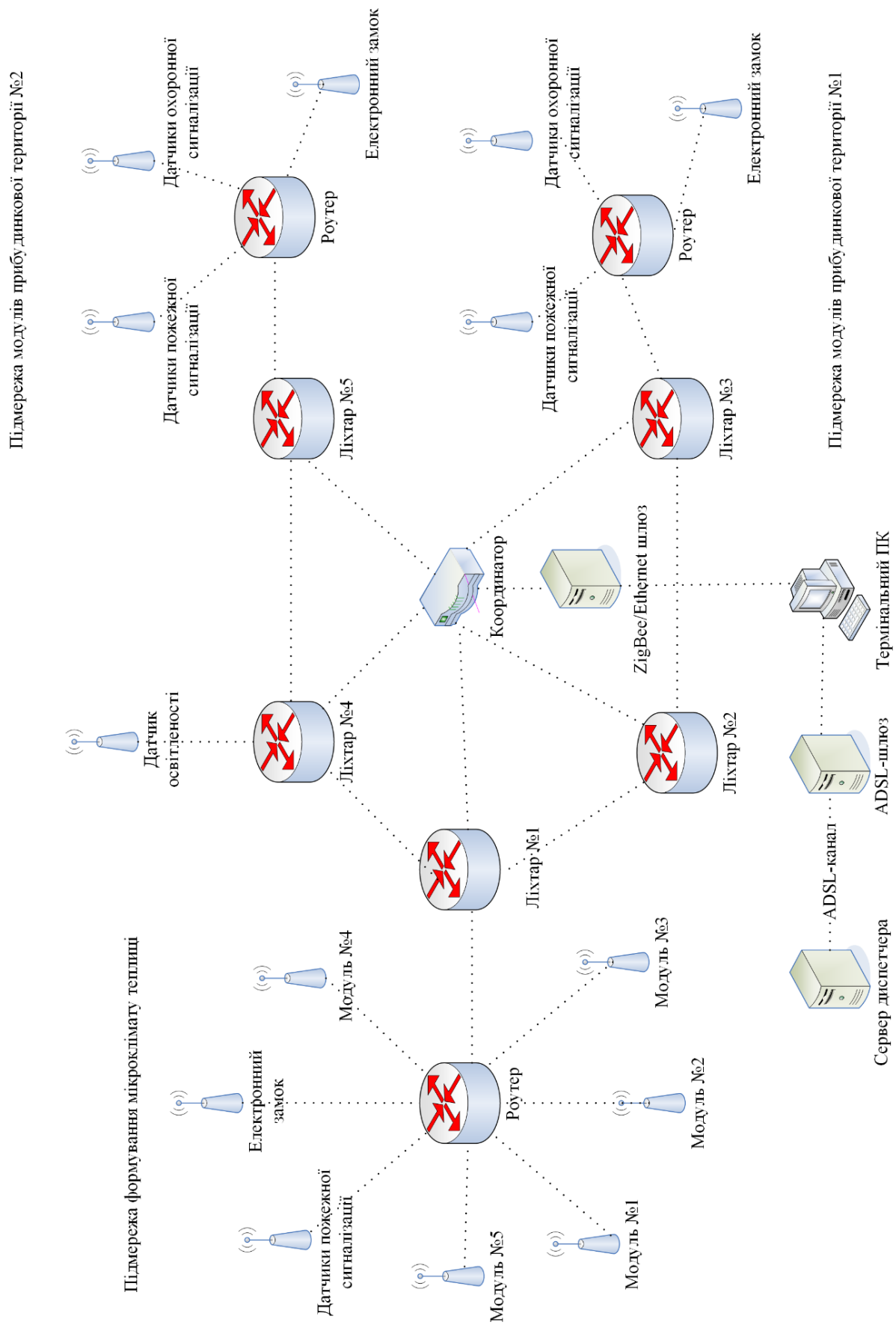


Рисунок 2.3 – Топології мереж ZigBee

Структура мережі, побудованої за схемою “зірка”, показана зліва на рис. 2.3. Після того як активований FFD (Full Function Device), він може сформувати свою власну мережу та стає координатором PAN. Всі зіркоподібні мережі функціонують незалежно одна від одної. Це досягається шляхом вибору ідентифікатора PAN, який не використовується в цей момент будь-якими іншими мережами в межах радіовидимості. Після вибору ідентифікатора PAN, координатор PAN дозволяє іншим мережевим пристроям, як FFD, так і RFD (Reduced Function Device) підключитися до мережі.

Об’єднанням топологій “зірка” та “точка-точка” є топологія “кластерне дерево”. В мережі типу “кластерне дерево” більшість пристроїв є FFD. Пристрої RFD підключаються до кластера в якості кінцевих приладів, тому що RFD не дозволяють з’єднуватися з іншими пристроями. Будь-який FFD може діяти як координатор і здійснювати синхронізацію інших пристроїв або інших координаторів.



Тільки один із цих координаторів може виконувати функцію головного координатора PAN, який може мати більші обчислювальні ресурси, ніж всі інші пристрої в мережі PAN.

В системі, що розробляється використовується багатокоміркова топологія мережі, яка дозволяє використовувати велику кількість маршрутизаторів для передавання інформації координатору. За рахунок значної надлишковості з'являється велика кількість обхідних маршрутів, що робить мережу відновлювальною, у випадку виходу з ладу одного чи декількох вузлів. Топологія мережі для управління тепличним комплексом наведена на рис. 2.4.

Вся мережа складається з підмереж. Кожна підмережа складається з кінцевих пристроїв з обмеженою функціональністю (RFD) та одного маршрутизатора (FFD). В якості кінцевих пристроїв використовуються датчики освітленості, вологості, диму, виконавчі механізми тощо. RFD можуть мати автономне живлення. Обхідні маршрути забезпечуються підмережею вуличного освітлення, призначення якої регулювати яскравість ліхтарів в залежності від рівня природнього світла. Кожен модуль, встановлений на ліхтарі є одночасно і маршрутизатором. Це оптимальний варіант, оскільки маршрутизатори, як правило, споживають більше електроенергії, ніж кінцеві пристрої. Однак до кожного ліхтаря вже підведена напруга, від якої можна жити і маршрутизатор. Вся інформація надходить до координатора мережі, який збирає її, обробляє та передає на термінальний ПК через шлюз. На терміналі встановлене програмне забезпечення, яке відповідно до даних, що надійшли від датчиків, видає команди на виконавчі механізми. ПЗ терміналу для кожного модуля розраховує оптимальні параметри (наприклад, відповідний рівень світла для даної пори року, рівень вологості для тих чи інших видів рослин в теплиці, температурний режим). Використання термінального ПК хоч і збільшує вартість системи, але зменшує навантаження на інші вузли, оскільки обчисленням параметрів вони не займаються, а лише вимірюють їх та виконують команди. Для зв'язку з диспетчерами охорони та комунальних служб застосовується технологія ADSL. Це пояснюється розповсюдженням телефонного зв'язку в приміських

регіонах та фактично відсутністю провайдерів, які застосовують технологію Ethernet в даному випадку.

2.4 Розрахунок відстані між вузлами мережі, вибір антен для зв'язку

Для теоретичного розрахунку максимальної відстані між вузлами мережі використовується формула реального радіозв'язку

$$P_2 = \frac{P_1 G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi d)^2} \cdot V^2, \quad (2.1)$$

де P_1 – потужність передавача;

P_2 – чутливість приймача;

G_1, G_2 – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен;

λ – довжина хвилі $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 2,4 \cdot 10^9 = 0,125$ м;

d – відстань між передавачем та приймачем;

V – множник ослаблення (виникає за рахунок природних предметів, земної поверхні тощо).

Для розрахунку відстані між вузлами мережі приймаємо наступні умови: антени ненаправлені $G_1 = G_2 = 1$; зв'язок здійснюється за умови прямої видимості та з урахуванням, що земна поверхня плоска $V = 1$. Розрахунок проводиться для трансивера CC2520. $P_1 = -18 \dots +5$ дБм (обираємо найгіршу умову -18 дБм), $P_2 = -98$ дБм. Перетворимо формулу (2.1) для розрахунку відстані в відносних одиницях з урахуванням прийнятих умов:

$$P_{2[\text{дБм}]} - 30 = P_{1[\text{дБм}]} - 30 + 20 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) - 20 \lg d \rightarrow d_{[\text{м}]} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot 10^{\frac{P_{1[\text{дБм}]} - P_{2[\text{дБм}]}}{20}}. \quad (2.2)$$

Отже, максимальна відстань дорівнює:

$$d_{[м]} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot 10^{\frac{P_{1[дБм]} - P_{2[дБм]}}{20}} = \frac{1}{8 \cdot 4\pi} \cdot 10^{\frac{-18+98}{20}} = \frac{10^4}{32\pi} \approx 100 \text{ м.}$$

В даному розрахунку не враховується ослаблення, викликане предметами навколишнього середовища, що мають місце на ділянці. Практичні випробування відстані зв'язку пристроїв Zigbee [14] показали, що на відкритому просторі дані передаються без втрат на відстань до 35 м у погану погоду (висока вологість, дощ).

Однак для передавання даних від віддалених приміщень (наприклад, теплиці в даному випадку) потужності трансивера може не вистачити і необхідно застосувати підсилювач. В даній системі підсилювач використовується в підмережі теплиці та для координатора. В якості підсилювача прийнято мікросхему CC2590 (табл. 1.11). Вихідна потужність підсилювача дорівнює +14 дБ, що теоретично забезпечить відстань (у випадку ідеальних умов і при незмінній чутливості приймача)

$$d_{[м]} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot 10^{\frac{P_{1[дБм]} - P_{2[дБм]}}{20}} = \frac{1}{8 \cdot 4\pi} \cdot 10^{\frac{14+98}{20}} = \frac{398107}{32\pi} \approx 4000 \text{ м.}$$

Цього цілком достатньо для забезпечення покриттям території об'єкту (навіть можна зменшити потужність).

Важливим елементом будь-якої безпроводової системи або вузла мережі є антена. Всі характеристики антен приводяться щодо ізотропної – теоретичної моделі, що випромінює однаково у всіх напрямках. У малопотужних безпроводових системах найчастіше використовуються дипольні або штирові антени.

По типу підключення виділяють два різновиди антен: антени з однієї точкою підключення та диференціальні антени.

Антени з однієї точкою підключення:

- звичайно мають опір 50 Ом;

- вимагають пасивної схеми узгодження для підключення до деяких типів мікросхем;

- легко аналізуються за допомогою мережевих аналізаторів;
- легко можна досягти високої продуктивності.

Диференціальні антени:

- прямо підключаються до диференціальних виходів мікросхем;
- дозволяють зменшити число зовнішніх компонентів;
- для досягнення потрібних показників у деяких випадках необхідна симуляція роботи;

- важко виміряти імпеданс;
- можливе досягнення продуктивності, порівнянної з антенами з однієї точкою підключення.

По способу фізичної реалізації виділяють: друковані, штирові та чип-антени.

Друковані антени:

- не підвищують вартість пристрою;
- вимагають більше простору на друкованій платі;
- мають значні розміри на низьких частотах;
- мають широкий діапазон;
- для реалізації необхідно спеціалізоване ПЗ.

Штирові антени:

- найкращий збіг реальних характеристик з теоретичними;
- менший вплив розміру антени на розміри кінцевого пристрою.

Чип-антени:

- менш дорогі;
- менший діапазон.

В даній системі використовуються ненаправлені друковані антени з однією точкою підключення. Це пов'язано з тим, що безпроводовий датчик встановлюється в будь-якому місці і немає можливості регулювати його положення для збільшення якості зв'язку. Приклади таких антени наведені в табл. 2.1 [4].

Таблиця 2.1 – Ненаправлені антени з однією точкою підключення 2,4 ГГц

Тип	Інвертована F-антена	Меандрова інвертована F-антена	Меандровий монополь
Зовнішній вигляд			
Ефективність площі антени, %	94	68	87
Ширина смуги пропускання, МГц	280	101	400
Розміри, мм	26×8	15×6	39×25

2.5 Розробка структурної схеми системи

Система управління системами промислового об'єкту складається з (рис. 2.5):

- 5 модулів для управління мікрокліматом теплиці;
- 8 модулів для управління вуличним освітленням;
- модулі для пожежної, охоронної сигналізації;
- координатора мережі, узгоджуючих шлюзів та каналів передавання даних до диспетчерської служби.

Управління мікрокліматом передбачає регулювання температури, вологості повітря та ґрунту, освітленості. Освітленість та вологість ґрунту визначається окремо для кожного сорту рослин відповідним модулем. Окреме регулювання вологості повітря та температури є проблематичним для невеликої теплиці, а тому дані параметри встановлюються загальними для всіх сортів рослин. Всі модулі мають датчики руху та диму.

З 5 модулів один є головним. Він включає в себе, крім вище зазначених функцій, також функції маршрутизації, регулювання температури, вологості повітря, відкриття/закриття електромеханічного замка. Він має підсилювач потужності сигналу, оскільки передбачається, що теплиця може знаходитись на відстані більшій, ніж 100 м.

Управління мікрокліматом здійснюється наступним чином: спочатку датчики всіх модулів вимірюють параметри та передають їх на координатор. Термінальний ПК обчислює параметри оптимальні для рослин відповідно до пори року, часу доби тощо. Якщо необхідно, передається інформація змінити той чи інший параметр для окремого або всіх модулів. Мікроклімат регулюється системою зрошування, кондиціонування та освітлення через силові регулятори. Загалом система живиться від мережі змінного струму, однак для датчиків охорони та протипожежної безпеки передбачено джерело безперебійного живлення. Оскільки кожен модуль обробляє інформацію з декількох датчиків, то використовується окремий мікроконтролер додатків.

В інших приміщеннях промислового об'єкту модулі ZigBee використовуються для охорони та протипожежної безпеки, управління відкриттям та закриттям дверей. Принцип роботи даних систем було розглянуто вище.

Всі датчики працюють на основі однокристального трансивера та мікроконтролера, оскільки кожен модуль має всього 1-2 датчики.

Система освітлення, крім регулювання, виконує також функції маршрутизації пакетів даних від інших модулів, оскільки опори ліхтарів розміщені по периметру ділянку, що є вдалим розташуванням для маршрутизаторів.

Інформація з усіх модулів збирається координатором мережі та обробляється термінальним ПК. Сигнал пожежі чи охорони через телефонні лінії зв'язку надходить до відповідних диспетчерів.

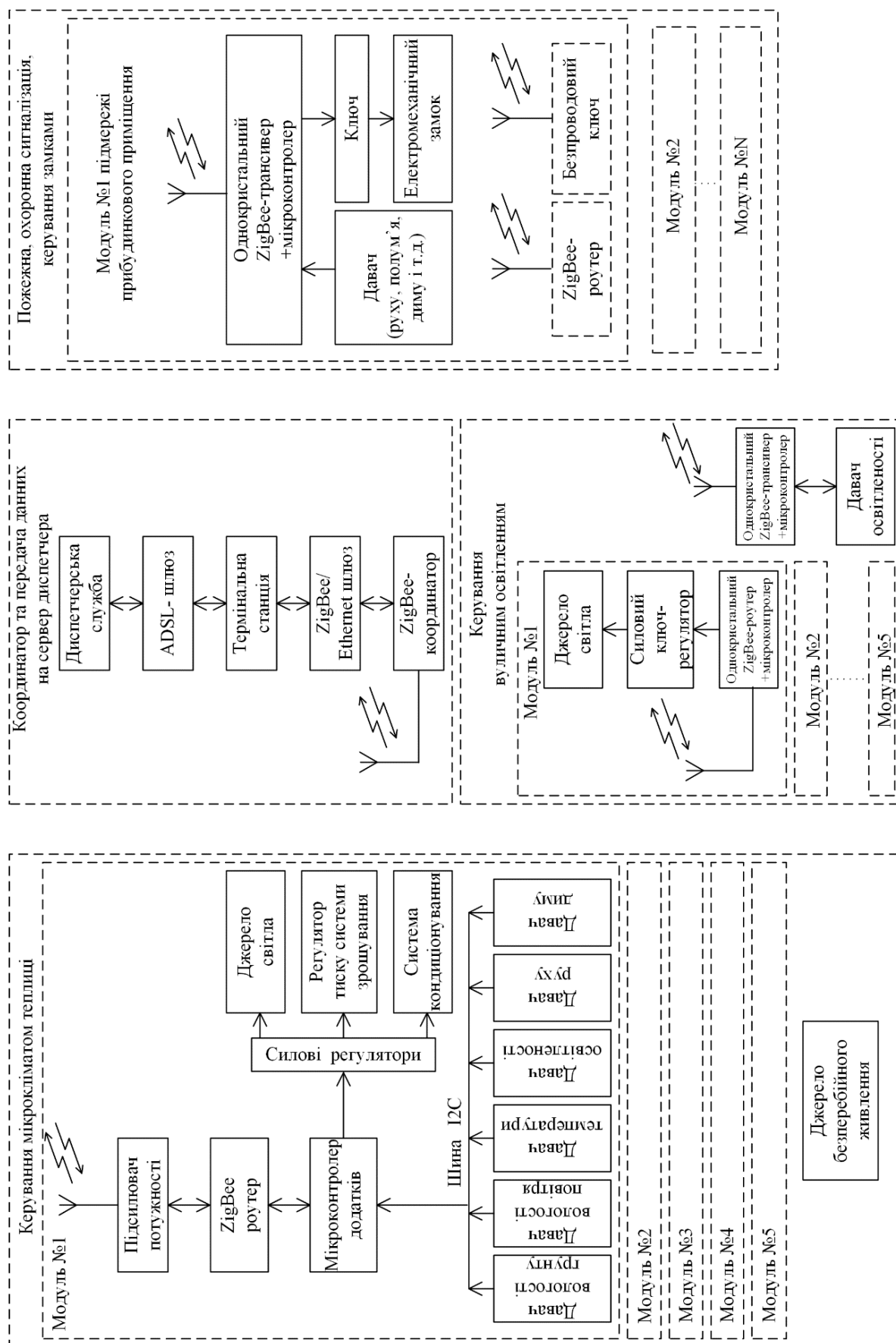


Рисунок 2.5 – Структурна схема системи управління тепличним комплексом

2.6 Розробка функціональної схеми головного модуля управління мікрокліматом теплиці

Функціональна схема модуля наведена на рис. 2.6. Вона складається з наступних підсистем:

- датчики. Деякі з них виконанні в інтегральному вигляді, а деякі у вигляді окремої схеми, зокрема, датчик вологості ґрунту, датчик диму, датчик руху;
- мікроконтролер додатків здійснює обробку інформації від датчиків;
- радіочастотний модуль призначений для прийому та передавання інформації, попереднього її перетворення з аналогової в цифрову форму і навпаки, функції шифрування та дешифрування сигналу, управління потужністю передавача та чутливістю приймача;
- виконавчі механізми представлені у вигляді системи кондиціонування та поливу. В даній роботі передбачений лише цифровий вихід для них. Також окремо розроблений регулятор освітленості на базі цифрового потенціометра та фазового регулятора потужності;
- джерело автономного живлення, призначене для забезпечення модуля енергією.

2.6.1 Радіочастотний блок

Радіочастотний блок представлений ZigBee-трансивером CC2520 та підсилювачем потужності CC2590. Основні параметри мікросхем наведені вище (п. 1.2.3). На рис. 2.6 наведена функціональна частина мікросхем, яка стосується радіочастотного тракту. В трансивері використовується O-QPSK модуляція (16 символів), тип приймача – прямого перетворення. В якості антени застосовується інвертована F-антена 2,4 ГГц-діапазону з коефіцієнтом підсилення 3,3 дБ (ненаправлена) DN007. Антенна є друкованою, що робить пристрій компактним. Зовнішній вигляд антени наведений на рис. 2.7. Для узгодження опорів антени та мікросхеми можливе використання узгоджувачого пристрою (УП).

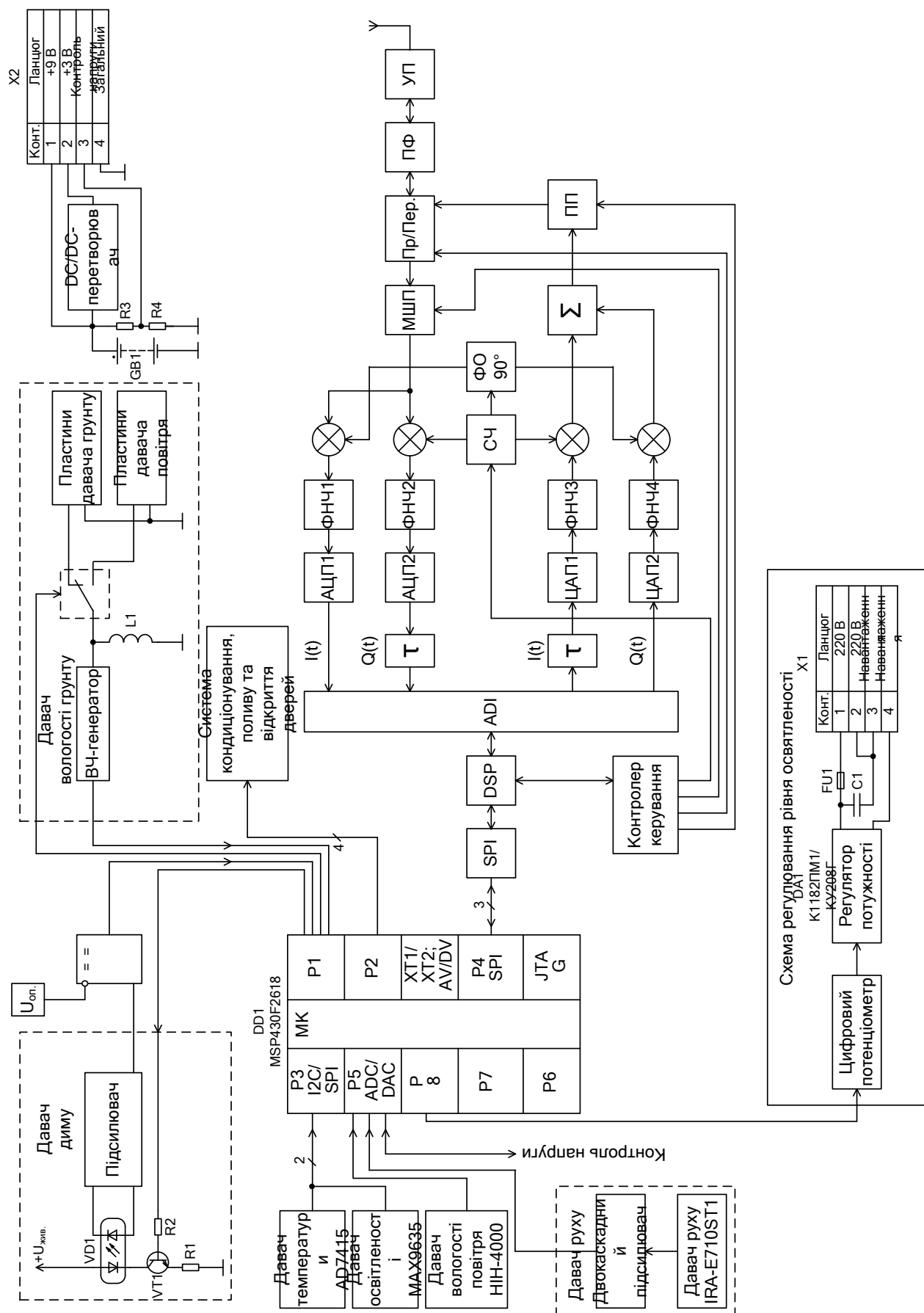


Рисунок 2.6 – Функціональна схема системи управління мікрокліматом теплиці



Рисунок 2.7 – 2,4 ГГц-антенна DN007

Для виділення необхідного спектру частот з ефіру використовується смуговий фільтр (СФ). Розподіл каналів наведений на рис. 2.1. Ширина смуги одного каналу дорівнює 2 МГц. Для спрощення проектування смугового фільтру він фільтрує групу частот основного та сусідніх каналів, складові сусідніх каналів притлумлюються після синхронного детектування ФНЧ перед АЦП (рис. 2.6).

Перемикання з прийому на передавання здійснюється диплексором, який керується контролером управління. В кожен момент часу модуль може працювати або як приймач, або як передавач.

При прийомі сигналу після фільтрації СФ він підсилюється малошумлячим підсилювачем (МШП), після чого сигнал надходить на два помножувачі (змішувачі). Сигнал QPSK складається з суми двох амплітудно-модульованих коливань: синфазної складової $I(t)$ та квадратурної $Q(t)$. Для виділення складових сума двох сигналів множиться на два гармонічних коливання, зсунутих на 90° . Ці коливання формуються синтезатором частоти (СЧ) та фазообертачем (ФО). Частоти сигналу та генератора мають бути рівними. На виході детектора утворюються 2 сигнали:

$$(I(t) \cdot \cos \omega_0 t + Q(t) \cdot \sin \omega_0 t) \cdot \cos \omega_0 t = 0,5I(t) + 0,5I(t) \cdot \cos 2\omega_0 t + 0,5Q(t) \cdot \sin 2\omega_0 t;$$

$$(I(t) \cdot \cos \omega_0 t + Q(t) \cdot \sin \omega_0 t) \cdot \sin \omega_0 t = 0,5I(t) - 0,5Q(t) \cdot \cos 2\omega_0 t + 0,5I(t) \cdot \sin 2\omega_0 t.$$

Для притлумлення небажаних складових, та зменшення завади з боку сусідніх каналів, продетектовані складові проходять через ФНЧ. Отриманий сигнал

перетворюється в цифровий код АЦП1 та АЦП2 (рис. 2.6) і далі передається через аналогово-цифровий інтерфейс (ADI) і цифровий сигнальний процесор (DSP) на мікроконтролер по інтерфейсу SPI. В ADI здійснюється синтез цифрового потоку з двох складових сигналу, оскільки кожен символ містить інформацію про 4 біти.

Передавання сигналу здійснюється в зворотньому порядку. ADI формує 2 квадратурні складові, які перетворюються аналоговий сигнал за допомогою ЦАП1 та ЦАП2, перемножуються з носійною частотою синтезатора та додаються в суматорі. Для збільшення радіусу дії передавача вихідний сигнал підсилюється ПП.

Контроль коефіцієнта підсилення МШП та ПП здійснюється на цифровому рівні на основі контролеру управління. Якщо в цифровому потоці багато помилок, то підсилення МШП збільшується і навпаки. У випадку частого надходження на модуль повідомлень про повторне передавання, потужність передавача збільшується.

Одним з недоліків канонічної квадратурної фазової модуляції є те, що при одночасній зміні символів в обох квадратурних каналах модулятора в сигналі QPSK відбувається стрибок фази носійної на 180° . При формуванні сигналу звичайної QPSK у цей момент відбуваються переміщення сигнальної точки через нуль, тобто є переміщення сигнальної точки на 180 градусів. У момент такого переміщення відбувається зменшення амплітуди формованого РЧ сигналу до нуля.

Подібні значні зміни сигналу небажані, оскільки приводять до збільшення смуги частот сигналу. Для підсилення такого сигналу, що має значну динаміку, потрібні високолінійні тракти передавачів та, зокрема, підсилювачів потужності. Зникнення РЧ сигналу в момент переходу сигнальної точки через нуль погіршує і якість функціонування систем синхронізації радіообладнання.

При квадратурній модуляції зі зсувом O-QPSK (Offset QPSK) разові фазові переміщення сигнальної точки обмежені 90 градусами. Одночасні її переміщення по I і Q каналам, тобто перехід на 180 градусів неможливі, що виключає переміщення сигнальної точки через нуль.

На рис. 2.8 [20] порівнюється переміщення сигнальної точки на векторній діаграмі для перших двох символів послідовності – від стану 11 до 01 для традиційної QPSK і для QPSK зі зсувом.

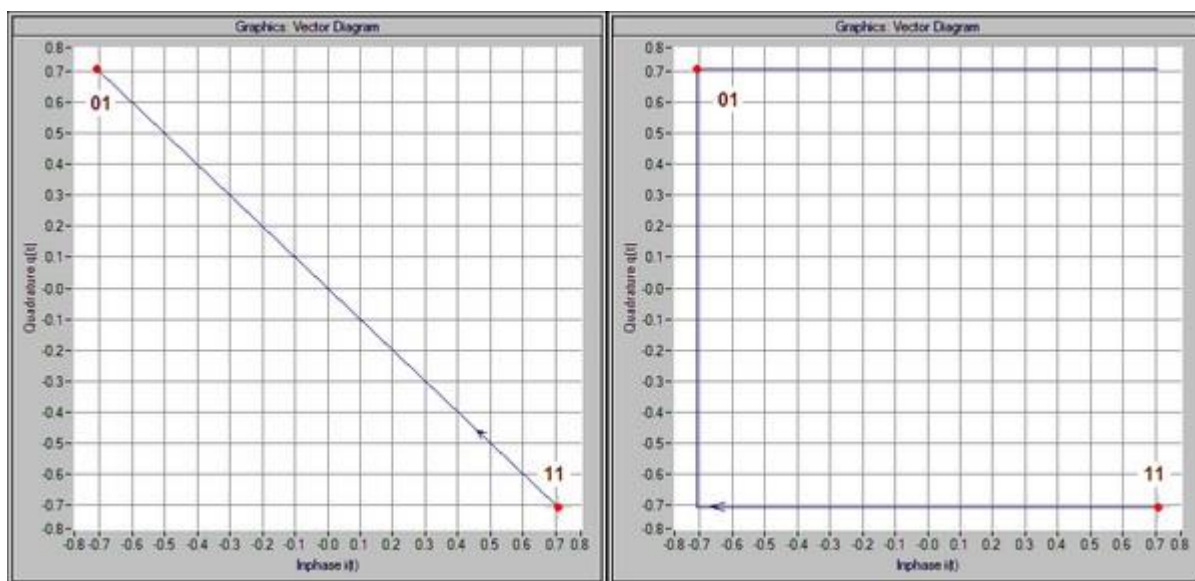


Рисунок 2.8 – Порівняння переміщення сигнальної точки з QPSK (зліва) та О-QPSK (зправа) для двох символів 11 та 01

У модуляції О-QPSK використовується те ж саме сигнальне кодування, що й в QPSK. Відмінність полягає в тому, що переміщення від одного модуляційного стану до іншого (від однієї точки в сузір'ї до іншої) виконується за два кроки. Спочатку, у тактовий момент на початку символу змінюється компонент I і після половини символу – компонента Q (або навпаки).

Для цього квадратурні компоненти інформаційної послідовності $I(t)$ і $Q(t)$ зміщаються в часі на тривалість одного інформаційного елемента $T = T_s/2$, тобто на половину тривалості символу, як показано на рис.2.9.

При такому зсуві компонентних сигналів кожна зміна фази формованого сигналу, по черзі створена квадратурними сигналами, визначається лише одним елементом вихідної інформаційної послідовності, а не одночасно двома (дібітом), як при QPSK. В результаті переходи фази на 180° відсутні, тому що кожний елемент вихідної інформаційної послідовності, що надходить на вхід модулятора

синфазного або квадратурного каналу, може викликати зміна фази лише на 0 , $+90^\circ$ або -90° .

Фазові переміщення сигнальної точки при формуванні сигналу O-QPSK відбуваються вдвічі частіше в порівнянні з QPSK, тому що компонентні сигнали не змінюються одночасно, але вони нерізкі. Інакше кажучи, величина фазових переходів є в O-QPSK меншою в порівнянні з QPSK, але частота їх удвічі більше.

В даній системі для формування O-QPSK сигналу використовується елементи затримки в передавальному та приймальному трактах (рис. 2.6) [20].

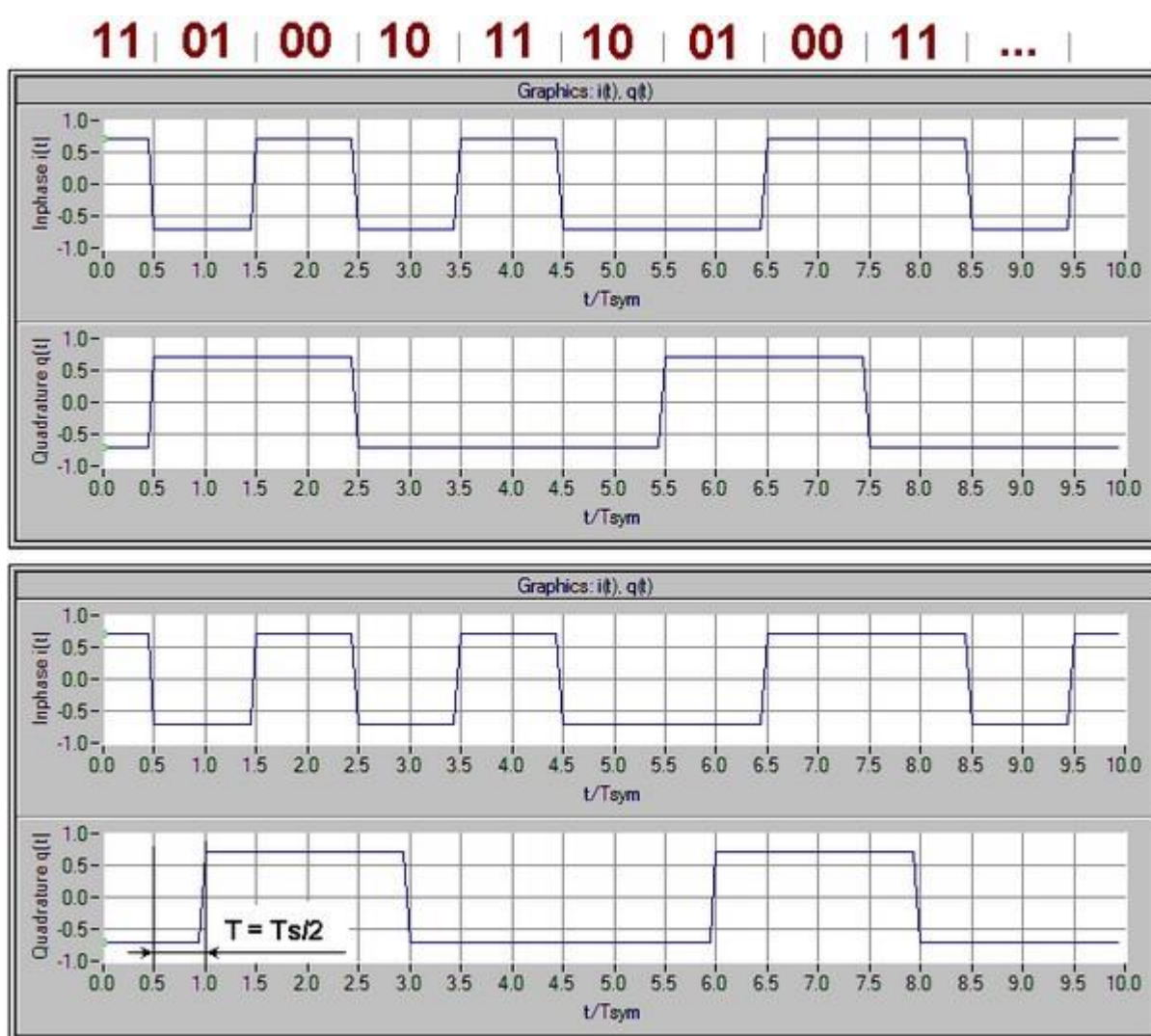


Рисунок 2.9 – Формування сигналів QPSK та O-QPSK для послідовності

110100101110010011

2.6.2 Датчики модуля та обробка даних за допомогою МК

В якості датчиків температури (AD7415), вологості повітря (НІН-400), освітленості (МАХ9635) використовуються готові інтегральні мікросхеми з внутрішньою обробкою сигналу та цифровим виходом у вигляді шини I2C. Основні параметри даних мікросхем та принципи їх функціонування було наведено вище (п. 1.2.1, табл. 1.3, 1.5, 1.4 відповідно). Датчики диму, руху та вологості ґрунту є окремими електронними блоками і роботу їх буде розглянуто детальніше.

Функціонально датчик диму (рис. 2.6) складається з оптопари, підсилювача сигналу фотодіода та АЦП МК, який перетворює сигнал датчика в цифрову форму і на основі коду детектується рівень диму в камері. Для визначення наявності диму використовуються інфрачервоний (ІЧ) діод та ІЧ-приймач, які встановлені в середині камери датчика. ІЧ-діод вмикається періодично транзисторним ключем VT1, а сигнал ІЧ-приймача тестується для визначення наявності диму в камері. Операційний підсилювач необхідний для підсилення сигналу ІЧ-приймача. Підсилений сигнал надходить на вхід АЦП МК. Якщо рівень сигналу перевищує поріг, то формується відповідний сигнал, який надходить на трансивер. У проміжки часу між вимірюваннями операційний підсилювач, ІЧ-діод та ІЧ-приймач вимикаються.

Наявність диму перевіряється кожні 8 с. Інтервал відраховується за допомогою внутрішнього таймера МК. Через 8 с генерується переривання, МК вмикає операційний підсилювач, дає йому час для встановлення на виході сигналу, а потім здійснює перетворення сигналу ІЧ-приймача при вимкненому ІЧ-діоді. Потім вмикається ІЧ-діод і відбувається перетворення вихідного сигналу ІЧ-приймача ще раз. Отримані два значення порівнюються для визначення наявності диму.

Для уникнення невірної формування сигналу тривоги дим має бути виявлений три рази. Лише після цього на трансивер надходить сигнал тривоги, який передається координатору мережі. Після першого виявлення диму, друга спроба відбувається через 4 с, а третя через 1с. Спрощена блок-схема роботи підпрограми

датчика диму наведена на рис.2.10 [1]. При відсутності диму рівень сигналу з ввімкненим ІЧ-діодом значно перевищує рівень сигналу у випадку вимкненого ІЧ-діоду. Якщо існує дим, то світло поглинається їм, тому різниця сигналів значно зменшується.

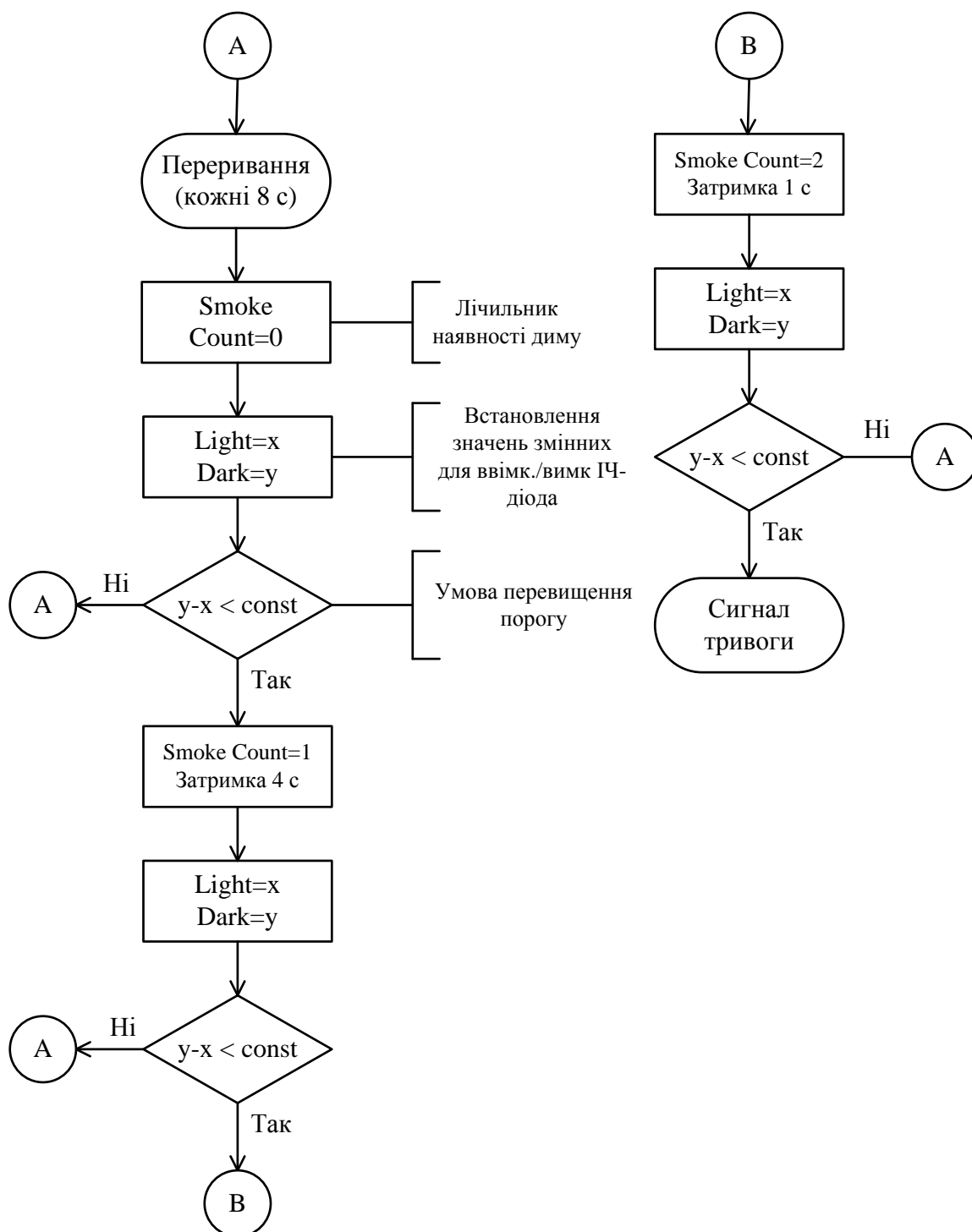


Рисунок 2.10 – Спрощена блок-схема підпрограми датчика диму

Датчик руху працює на піроелектричному принципі, визначає рівень інфрачервоного випромінювання в полі зору датчика. Сигнал на виході піроелектричного датчика залежить від рівня ІЧ-випромінювання. З появою людини або іншого об'єкта з температурою більшою, ніж температура фону, на виході піроелектричного датчика підвищується напруга. Для того щоб визначити, чи рухається об'єкт, в датчики використовується лінза Френеля, яка фокусує ІЧ-випромінювання на область чутливості. При переміщенні об'єкта, інфрачервоне випромінювання від нього приймається та фокусується різними сегментами лінзи, що формує кілька послідовних імпульсів на виході піроелектричного датчика. Вихідний сигнал піроелектричного датчика має рівень декілька мВ, отже, для його наступної обробки необхідний мікроконтролер з АЦП високої точності, або використання попереднього каскаду посилення.

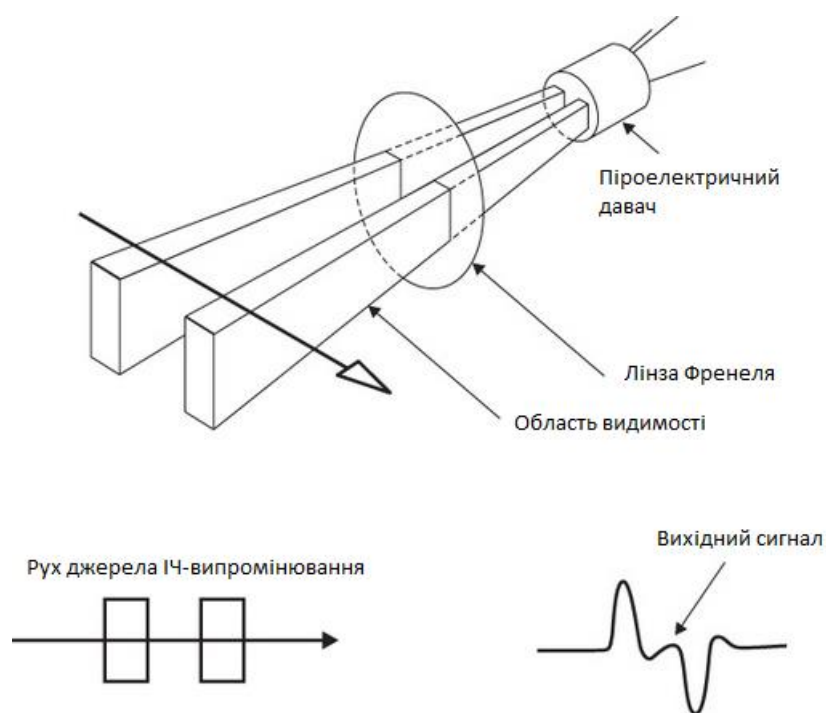


Рисунок 2.11 – Принцип дії піроелектричного датчика

Піроелектричні датчики можуть мати відразу дві чутливі області, причому при впливі на одну з областей напруга на виході датчика збільшується, а при впливі на другу – зменшується (рис. 2.11) [23].

Застосування здвоєного піроелектричного датчика дає можливість не тільки детектувати появу об'єкта інфрачервоного випромінювання, але також і визначати напрямок його руху. Крім цього, при впливі на обидві області одночасно, вихідний сигнал піроелектричного датчика не змінюється, тобто знижується ймовірність неправильних спрацьовувань (поява сонця через хмари, зміна температури в приміщенні). У свою чергу, застосування датчика з однією чутливою зоною дозволяє за зміною середнього рівня вихідного сигналу визначити рівень освітленості в приміщенні, позбувшись, таким чином, від додаткового фотодіода або фоторезистора в системі.

Піроелектричний датчик довго стабілізується (типове значення – близько 5 с), тому він залишається ввімкненим весь час, в той час як на операційні підсилювачі живлення може бути подане (з виводу мікроконтролера) безпосередньо перед запуском АЦП мікроконтролера.

Блок-схема алгоритму роботи мікроконтролера в датчики руху наведено на рис. 2.12 [23]. Мікроконтролер більшу частину часу перебуває в режимі зниженого енергоспоживання LPM3 та виходить з нього для здійснення аналогово-цифрового перетворення вихідного сигналу піроелектричного датчика, обчислення різниці між поточним і попереднім значенням АЦП, прийняття рішення. Таймер, що працює в режимі LPM3, має 16-бітний лічильник та відраховує інтервали часу між ввімкненнями АЦП.

Ядро мікроконтролера використовується тільки для обчислення різниці між отриманим результатом АЦП і попереднім значенням ($|new - old|$), порівняння цієї різниці із заданим порогом та прийняття рішення при перевищенні порогу ($threshold$). Якщо поріг перевищений, мікроконтролер видає сигнал тривоги для передавання його через мережу ZigBee.

Вимірювання вологості ґрунту базується на LC-генераторі ВЧ-коливань. Датчиком вологості є звичайні дві пластини, які розміщені в ґрунті. При зміні

вологості змінюється діелектрична проникність ґрунту, а тому змінюється ємність утвореного конденсатора. В результаті при різних значеннях вологості ґрунту генератор змінює частоту коливань. Для зменшення впливу температури, атмосферного тиску і т.д., визначається різниця частот двох датчиків: вологості повітря та ґрунту. Функцією МК є визначення частоти генератора, а обчислення вологості ґрунту через частоту є функцією термінального ПК. Фактично модуль передає координатору лише частоту генератора.

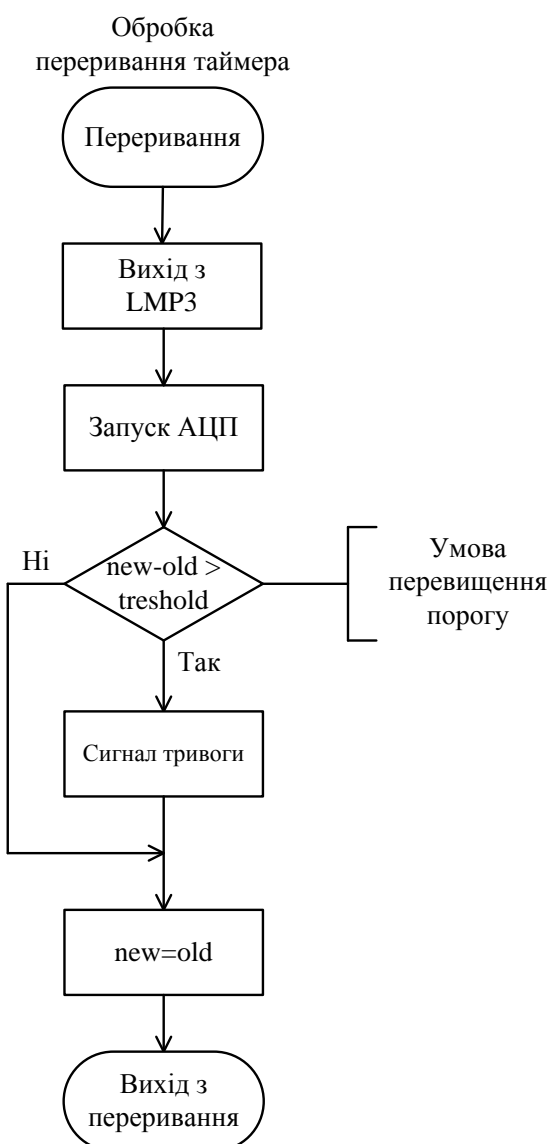


Рисунок 2.12 – Блок-схема алгоритму роботи датчика руху

Програмна реалізація частотоміра проста. МК вмикає ВЧ-генератор та підраховує кількість імпульсів за 1 мс (таким чином частота визначається в кГц). Алгоритм роботи частотоміра наведений на рис. 2.13. Спочатку МК вмикає ВЧ-генератор, після чого вмикається таймер на час 1 мс. Напротязі цього часу МК рахує кількість імпульсів генератора. Оскільки ґрунт має достатньо велику провідність, то датчик не є ідеальним конденсатором (рис 2.14), а тому його необхідно калібрувати.

Підпрограма обробки
даних давача ґрунту

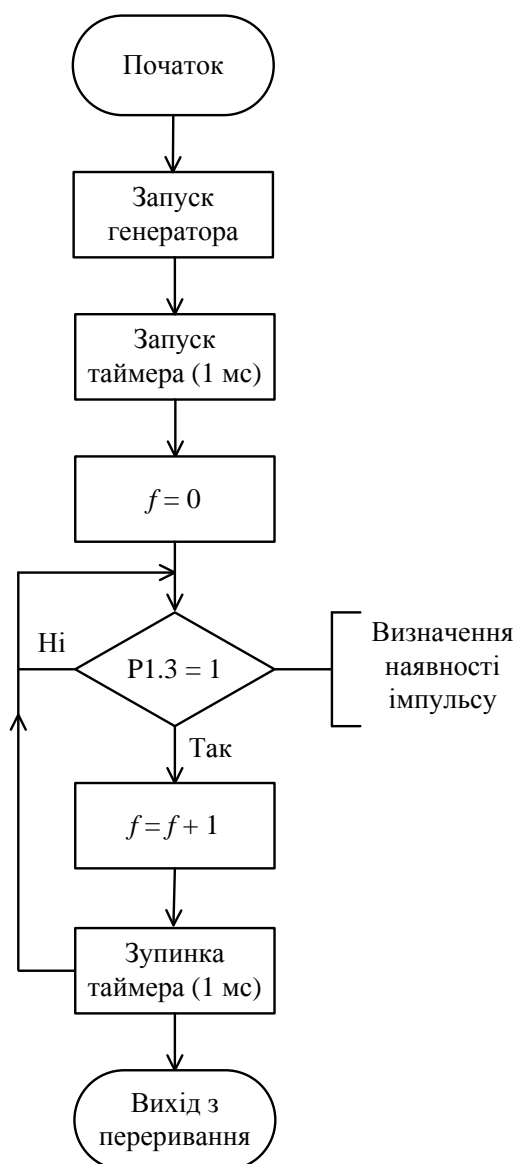


Рисунок 2.13 – Підпрограма обробки даних датчика ґрунту

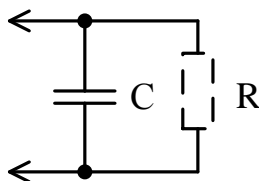


Рисунок 2.14 – Модель датчика вологості ґрунту

Для обробки даних датчиків використовується економічний 16-бітний мікроконтролер.

2.6.3 Виконавчі механізми та джерело живлення модуля

В даній роботі не передбачено проектування виконавчих механізмів, таких як: система кондиціонування, зрошування та електромеханічний замок. На ринку достатньо багато таких систем, тому модуль має лише цифровий вихід, який передає інформацію про необхідні параметри мікроклімату та команди на закриття/відкриття замка.

Для прикладу наведено проектування системи регулювання рівня освітленості (рис. 2.6). В ній реалізований фазовий принцип регулювання потужності навантаження на базі мікросхеми K1182ПМ1.

При фазовому способі регулювання використовується залежність між моментом (фазою) відкриття регулюючого елемента відносно початку півперіоду напруги живлення та потужністю, що споживається пристроєм. Для регулювання потужності використовується ключовий елемент, у якості якого найбільше зручний симистор. Змінюючи затримку (фазу) часу відкриття симистора відносно початку півхвилі напруги живлення можна регулювати потужність навантаження практично від 0 до 100%. Залежність напруги на навантаженні від фази відкриття симистора показана на рис.2.15.

Оскільки мікросхема K1182ПМ1 передбачає змінний резистор для регулювання потужності, а вихід МК є цифровим, то для узгодження використовується цифровий потенціометр.



Рисунок 2.15 – Залежність напруги на навантаженні від фази відкриття симистора

Живлення модуля здійснюється від 12 В акумуляторної батареї великої ємності, оскільки даний модуль є основним для системи створення мікроклімату теплиці та споживає значну потужність під час передавання та прийому даних. Для отримання різних значень напруг використовується DC/DC-перетворювач (рис. 2.6). Також передбачений контроль напруги батареї з наступною відправкою даних на координатор мережі.

Висновки до розділу 2:

Проведено вибір робочого частотного діапазону та типу мережевої технології, що задовольняє потреби проектованої системи. Розраховано ефективну швидкість передавання даних. Спроековано топологію мережі системі тепличного

комплексу. Також розраховано відстані між вузлами мережі та обрано антени для зв'язку.

Було розроблено структурну схему всього тепличного комплексу та функціональну схему головного модуля управління мікрокліматом.

Детально розглянуто радіочастотний блок, датчики тепличних модулів, виконавчі механізми та джерело живлення модуля.

Для реалізації системи управління тепличного комплексу доцільно використовувати в якості датчиків температури AD7415, вологості повітря – НН-400, освітленості – MAX9635.

Для зменшення навантаження центрального координатора рекомендовано використовувати змішану топологію мережі.

3 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ МОДУЛЯ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦІ

3.1 Розрахунок ВЧ-генератора датчика вологості ґрунту

Для ВЧ-генератора датчика вологості ґрунту обрано схему з автотрансформаторним зв'язком між виходом та входом однокаскадного транзисторного підсилювача (рис. 3.1). Генератор складається з двох каскадів: генератор гармонічної напруги на транзисторі VT2 та формувач прямокутних імпульсів на транзисторі VT1.

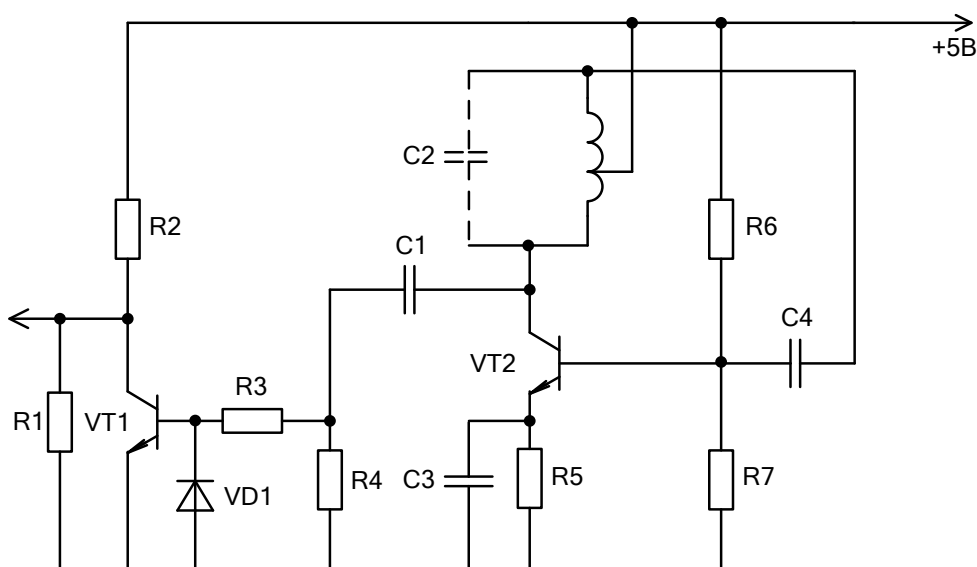


Рисунок 3.1 – Принципова схема генератора датчика вологості ґрунту

Вихідними даними для розрахунку генератора є частота $f_{\text{ген}}$ генератора, напруга живлення генератора $U_{\text{жив}}$ та вихідна потужність $P_{\text{вих}}$. Оскільки даний генератор є вимірювальним, то вихідну потужність генератора обираємо довільно. Частоту генератора задаємо $f_{\text{ген}} = 1$ МГц. Розрахунок генератора проводимо за методикою наведеною в [22].

1. Оскільки генератор може бути малопотужним, то основним фактором при виборі транзистора VT2 є максимальна частота роботи біполярного транзистора f_{\max} . Обираємо транзистор КТ315Б з $f_{\max} = 250$ МГц. Таким чином умова $f_{\max} > f_{\text{ген}}$ виконується. Вихідну потужність генератора задаємо $P_{\text{вих}} = 0,05$ Вт. З урахуванням ККД η_k більшості коливальних контурів 0,5...0,8 обчислюємо максимальну потужність, що розсіюється на колекторі:

$$P_{k.\text{макс}} = P_{\text{вих}}/\eta_k = 0,05/0,5 = 0,1 \text{ Вт.}$$

$P_{k.\text{макс}} = 0,15$ Вт для КТ315Б, отже транзистор знаходиться в нормальному температурному режимі.

Напругу живлення задаємо рівною $U_{\text{жив}} = 5$ В.

2. Розраховуємо енергетичний режим роботи генератора. Обираємо імпульс колекторного струму косинусоїдальної форми. Враховуючи, що в критичному режимі кут відсічки струму колектора $\theta = 90^\circ$, по графікам (рис. 3.2) знаходимо коефіцієнти розкладу імпульсу колекторного струму $\alpha_1 = 0,5$ та $\alpha_0 = 0,318$.

Обчислимо середній час руху носіїв τ струму між p - n переходами транзистора за формулою:

$$\tau \approx 1/2\pi f_{\max} = 0,6366 \text{ нс.}$$

Обчислюємо кут пробігу носіїв струму $\varphi_{\text{пр}}$:

$$\varphi_{\text{пр}} = 2\pi f_{\text{ген}} \tau = 6,28 \cdot 10^6 \cdot 0,6366 \cdot 10^{-9} \approx 0,004 = 0,2292^\circ.$$

Оскільки величина $\theta_e = \theta - \varphi_{\text{пр}} = 90^\circ - 0,2292^\circ = 89,7708^\circ \approx \theta$, то можна вважати, що коефіцієнти розкладу імпульсу емітерного струму дорівнюють відповідним коефіцієнтам колекторного струму: $\alpha_1 = \alpha_{1(e)} = 0,5$ та $\alpha_0 = \alpha_{0(e)} = 0,318$.

Коефіцієнт використання колекторної напруги обчислюємо за співвідношенням:

$$\xi = 1 - \frac{2P_k}{U_{\text{жив.}}^2 S_{\text{кр.}} \alpha_1},$$

де $S_{\text{кр}}$ – крутизна лінії критичного режиму для обраного транзистора. Для КТ315Б за довідником [29] визначаємо $S_{\text{кр}} = 180 \text{ мА/В}$.

$$\xi = 1 - \frac{2P_k}{U_{\text{жив.}}^2 S_{\text{кр.}} \alpha_1} = 1 - \frac{2 \cdot 0,05}{25 \cdot 0,18 \cdot 0,5} \approx 0,9556.$$

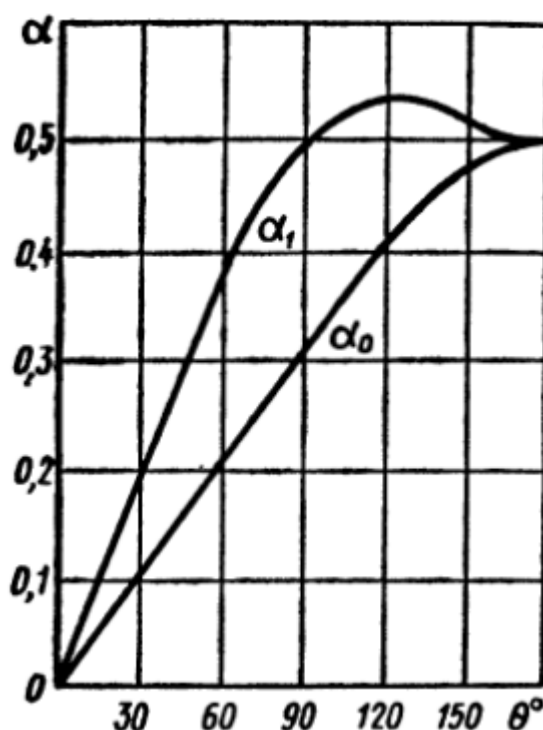


Рисунок 3.2 – Графіки коефіцієнтів розкладу імпульсів струму

Обчислюємо основні електричні параметри режиму:

Амплітуда змінної напруги в контурі:

$$U_{\text{тк}} = \xi \cdot U_{\text{жив.}} = 0,9556 \cdot 5 = 4,778 \text{ В};$$

Амплітуда першої гармоніки колекторного струму:

$$I_{K1m} = \frac{2 \cdot P_K}{U_{mk}} = \frac{2 \cdot 0,05}{4,778} = 0,0209 \text{ A};$$

Постійна складова колекторного струму:

$$I_{K.пост} = \frac{\alpha_0 \cdot I_{K1m}}{\alpha_1} = \frac{0,318 \cdot 0,0209}{0,5} \approx 0,0133 \text{ A};$$

Максимальне значення імпульсу струму колектора:

$$I_{K.i.макс} = \frac{I_{K1m}}{\alpha_1} = \frac{0,0209}{0,5} \approx 0,0418 \text{ A};$$

Потужність, що розсіюється джерелом струму в колі колектора:

$$P_0 = I_{K.пост} \cdot U_{жив} = 0,0133 \cdot 5 = 0,0665 \text{ Вт};$$

Потужність, що розсіюється на колекторі:

$$P_{K.роз} = P_0 - P_K = 0,0665 - 0,05 = 0,0165 \text{ Вт};$$

ККД в колі колектора:

$$\eta = \frac{P_K}{P_0} = \frac{0,05}{0,0665} = 0,7519.$$

Еквівалентний резонансний опір контуру в колі колектора:

$$R_{\text{рез}} = \frac{U_{\text{мк}}}{I_{\text{К1м}}} = \frac{4,778}{0,0209} = 228,6124 \text{ Ом}$$

Обчислимо параметр h_{216} через параметр h_{21e} . Для транзистора КТ315Б $h_{21e} = 50 \dots 350$. Обираємо найгірший випадок $h_{21e} = 50$.

$$h_{216} = \frac{h_{21e}}{1 + h_{21e}} = \frac{50}{1 + 50} \approx 0,9804.$$

Оскільки частота генератора (1 МГц) значно менше максимальної частоти роботи транзистора (250 МГц), то на робочій частоті коефіцієнт передавання струму h_{216} фактично не зміниться.

Обчислимо амплітуду першої гармоніки струму емітера:

$$I_{\text{Е1м}} = \frac{I_{\text{К1м}}}{h_{216}} = \frac{0,0209}{0,9804} \approx 0,0213 \text{ А.}$$

Знаходимо амплітуду імпульсу струму емітера:

$$I_{\text{Е.і.маx}} = \frac{I_{\text{Е1м}}}{\alpha_{1(e)}} = \frac{0,0213}{0,5} = 0,0426 \text{ А.}$$

Розраховуємо амплітудне значення напруги збудження на базі транзистора, необхідної для забезпечення імпульсу струму емітера $I_{\text{Е.і.маx}}$ без урахування впливу частоти:

$$U_{\text{БEm}} = \frac{I_{\text{Е.і.маx}}}{(1 - \cos \theta_e) S_0},$$

де S_0 – крутизна характеристики струму колектора. Відповідно до характеристик транзистора КТ315Б визначаємо $S_0 = 75$ мА/В:

$$U_{\text{БЕм}} = \frac{I_{\text{Е.і.мак}}}{(1 - \cos \theta_{\text{е}}) S_0} = \frac{0,0426}{(1 - \cos(89,7708^\circ)) \cdot 0,075} = 0,5703 \text{ В.}$$

Обчислюємо напругу зміщення на базі, що забезпечує кут відсічки струму емітера:

$$U_{\text{БЕзм.}} = U_{\text{падБЕ.}} + U_{\text{БЕм.}} \cos \theta_{\text{е}} = 0,6 + 0,5703 \cdot \cos(89,7708^\circ) \approx 0,6023 \text{ В,}$$

де $U_{\text{падБЕ.}}$ – падіння напруги на переході база-емітер транзистора в прямому напрямку (для кремнієвих транзисторів 0,6 В).

Знаходимо коефіцієнт зворотнього зв'язку:

$$K_{\text{зв}} = \frac{U_{\text{БЕм}}}{U_{\text{тк}}} = \frac{0,5703}{4,778} \approx 0,1194.$$

Для виконання балансу амплітуд необхідно виконати наступну умову:

$$K_{\text{зв}} > K_{\text{зв.мін}} = \frac{1}{S_0 \cdot R_{\text{рез}}} = \frac{1}{0,075 \cdot 228,6124} \approx 0,0583.$$

Умова виконується, отже, в генераторі будуть створені незагасаючі коливання.

3. Розрахунок номіналів компонентів генератора. Обчислюємо опори резисторів R6 та R7 (рис. 3.1). Для цього задаємо струм дільника, який проходить через ці резистори:

$$I_{\text{д}} \approx 5 \cdot I_{\text{б.пост.}},$$

де $I_{\text{б.пост.}}$ – постійна складова струму бази обраного транзистора. Дану величину обчислюємо за формулою:

$$I_{\text{б.пост.}} = \frac{I_{\text{к.пост.}}}{h_{21\text{е}}} = \frac{0,0133}{50} \approx 0,266 \text{ мА.}$$

Обчислюємо опір резистора R7:

$$R7 = \frac{U_{\text{БЕЗМ}}}{I_{\text{д}}} = \frac{0,6023}{5 \cdot 0,266} = 0,452 \text{ кОм.}$$

Із ряду E24 обираємо резистор 470 Ом. Опір резистора R6 обчислюється за співвідношенням:

$$R6 = \frac{U_{\text{жив}} - U_{\text{БЕЗМ}}}{I_{\text{д}}} = \frac{5 - 0,6023}{5 \cdot 0,266} \approx 3,3065 \text{ кОм.}$$

Обираємо резистор опором 3,3 кОм. Обчислюємо ємність роздільного конденсатора C4 на базі співвідношення:

$$C4 \approx (10 \dots 20) \cdot C_{\text{е}} = 20 \cdot 6 \cdot 10^{-12} = 120 \text{ пФ,}$$

де $C_{\text{е}}$ – ємність емітерного переходу транзистора КТ315Б.

Обчислюємо параметри ланки термостабілізації C3R5. Опір резистора R5 дорівнює:

$$R5 = \frac{U_E}{I_{E.\text{пост}}} = \frac{1}{0,0133} \approx 75 \text{ Ом},$$

де U_E – падіння напруги на резисторі емітерної стабілізації (0,7...1,5 В);

$I_{E.\text{пост}}$ – постійний струм емітера ($I_{E.\text{пост}} = I_{K.\text{пост}}$).

Ємність конденсатора С3 дорівнює:

$$C3 \geq \frac{(15...30)}{2\pi f_{\text{ген}} R5} = \frac{15}{6,28 \cdot 10^6 \cdot 75} \approx 31,83 \text{ нФ}.$$

Обираємо конденсатор ємністю 33 нФ. Обчислимо параметри коливального контуру генератора. Для цього задамо добротність одиночного (ненавантаженого) контуру. Для діапазону частот 300 кГц...3МГц рекомендована добротність [22] $Q = 80...200$. Обираємо добротність $Q = 150$. Добротність навантаженого контуру можна поррахувати за формулою:

$$Q' = Q \cdot (1 - \eta_k) = 150 \cdot (1 - 0,5) = 75.$$

Знаходимо мінімальну ємність контуру $C_{k.\text{min}}$ за наближеною формулою:

$$C_{k.\text{min}} \approx (1...2) \cdot \lambda_p, \text{ пФ} = 3 \cdot 10^8 / 10^6 = 300 \text{ пФ}.$$

В загальну ємність контуру $C_{k.\text{min}}$ входять ємність конденсатора датчика С2 та паразитні ємності: вихідна ємність транзистора, ємність котушки контура, ємність монтажу тощо. Оскільки генератор повинен калібруватись, так як в якості конденсатора С2 використовуються дві пластини, то паразитні ємності можна не враховувати.

Обчислюємо загальну індуктивність котушки L1:

$$L1 = \frac{1}{4\pi^2 f_{\text{ген}}^2 C2} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 10^{12} \cdot 300 \cdot 10^{-12}} \approx 84,43 \text{ мкГн.}$$

Обчислюємо верхню частину індуктивності (за схемою рис. 3.1), що підключається до бази транзистора:

$$L_{\text{в}} = K_{\text{зв}} \cdot L1 = 0,1194 \cdot 84,43 \approx 10,08 \text{ мкГн.}$$

Обчислюємо величину індуктивності зв'язку контуру з колектором транзистора:

$$L_{\text{н}} = L1 - L_{\text{в}} = 84,43 - 10,08 = 74,35 \text{ мкГн.}$$

На транзисторі VT1 реалізований формувач імпульсів. Елемент C1 та R4 призначені для розділення змінної та постійної складових сигналу. Прийнемо значення R4 рівним 1 кОм. Тоді ємність конденсатора C1 рівна:

$$C1 \geq \frac{1}{2\pi f_{\text{ген}} R4} = \frac{1}{6,28 \cdot 10^6 \cdot 10^3} \approx 159 \text{ пФ.}$$

Обираємо ємність C1 = 160 пФ. Для обмеження струму бази резистор R3 обираємо в 10 разів більшим, ніж R4, щоб не впливати на роботу ФВЧ (C1R4). Транзистор VT1 такий же, як і VT2 – КТ315Б. Діод VD1 для притлумлення нижньої півхвилі сигналу обираємо ГД507А.

Резистори R1 та R2 формують дільник напруги для узгодження вихідного сигналу формувача імпульсів 5 В та рівня логічної одиниці мікроконтролера (приблизно 3 В). Оберемо сумарний опір дільника рівним 10 кОм. Тоді струм дільника дорівнюватиме:

$$I_{\text{д}} = \frac{U_{\text{жив}}}{R_{\text{д}}} = \frac{5}{10^4} = 0,5 \text{ мА.}$$

Опори резисторів R1 та R2 відповідно дорівнюватимуть:

$$R1 = \frac{U_{R1}}{I_{\text{д}}} = \frac{3}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 6 \text{ кОм} \rightarrow R2 = 10 - 6 = 4 \text{ кОм.}$$

Обираємо R1 = 5,6 кОм, а R2 = 4,3 кОм.

3.2 Розрахунок DC/DC-перетворювача

Принципова схема DC/DC-перетворювача, яка використовується в даній роботі наведена на рис. 3.3 [24]. Номінали більшості елементів можна обрати з опису виробника-мікросхеми.

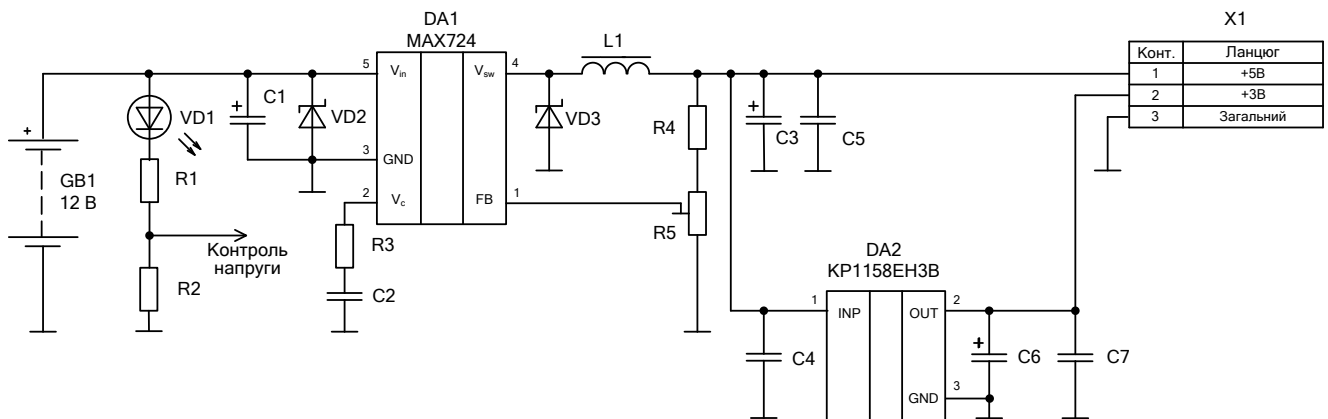


Рисунок 3.3 – Принципова схема DC-DC перетворювача

В якості ШІМ-контролера в схемі використовується мікросхема MAX724 з наступними основними параметрами:

- максимальне значення вхідної напруги ($U_{\text{in.max}}$) – 40 В;
- мінімальне значення вхідної напруги ($U_{\text{in.min}}$) – 8 В;

- максимальний струм навантаження ($i_{\text{н.}}$) – 6,5 А;
- максимальне падіння напруги на ключовому елементі у відкритому стані (U_{sw}) – 2,3 В;

- максимальний коефіцієнт заповнення (γ) – 0,9;
- частота перетворення (f) – 100 кГц.

Вхідні дані для розрахунку схеми перетворювача:

- номінальна напруга навантаження ($U_{\text{н.}}$) – 5 В;
- номінальний струм навантаження ($i_{\text{н.}}$) – 0,5 А;
- номінальне значення напруги живлення ($U_{\text{жив.}}$) – 12 В;

Враховуючи рекомендації виробника мікросхеми опір резистора $R_5=2,2$ кОм, а зв'язок між резисторами R_5 та R_4 наступний

$$R_4 = \frac{U_{\text{н.}} R_5}{2,21} - R_5 = \frac{5 \cdot 2,2}{2,21} - 2,2 \approx 2,78 \text{ кОм.}$$

З ряду E24 обираємо $R_4=2,7$ кОм.

Номінали конденсаторів C_1 та C_2 , а також резистор R_3 обираємо відповідно до рекомендації виробника мікросхеми:

$C_1=220$ мкФ;

$C_2=0,01$ мкФ;

$R_3=2,7$ кОм.

Індуктивність згідно рекомендації виробника $L_1=50$ мкГн для вихідної напруги 5 В та вихідного струму 5 А. Оскільки вихідні параметри перетворювача відрізняються від прикладу заданого виробником, перевіримо величину індуктивності з точки зору режиму розривних струмів (1.4). Нехай $\gamma_{\text{min}}=0,1$

$$L \geq \frac{(1 - \gamma_{\text{min}}) R_{\text{н.}}}{2f} = \frac{(1 - \gamma_{\text{min}}) U_{\text{н.}}}{2f i_{\text{н.}}} = \frac{(1 - 0,1) \cdot 5}{2 \cdot 10^5 \cdot 0,5} = 45 \text{ мкГн.}$$

Отже, задана виробником індуктивність підходить. З урахуванням типу індуктивності, яка пропонується розробником, обираємо індуктивність фірми Sumida Electronic (Японія) серії CDR125NP-101M з максимальним струмом 1,05 А.

Конденсатор $C3 = 470$ мкФ (призначений для додаткової фільтрації вихідної напруги).

В якості діода VD3 розробники рекомендують використати діод Шоткі MBR745 або 1N5820-1N5825 виробництва фірми Motorola.

Для захисту від перенапруги використовується захисний діод TRANSIL (VD2) типу 1,5KE36A.

Електролітичні конденсатори типу K50-29 або більш сучасні – K50-35. Неполлярні конденсатори – будь-які керамічні малогабаритні, наприклад, K10-17.

Резистори МЛТ, С2-33 або інші аналогічні. Підстроювальний резистор СП5-16ВА.

Для індикації живлення та як дільник напруги для контролю заряду батареї використовується світлодіод VD1 і резистори R1 та R2. Світлодіод обираємо АЛ102АМ з $U_{пр. макс} = 2,8$ В, $I_{пр.} = 5$ мА. Отже, сумарний опір дільника R1 та R2 дорівнює (пряма напруга менша, ніж максимально можлива):

$$R_d = \frac{U_{жив} - U_{пр.}}{I_{пр.}} = \frac{12 - 2}{5} = 2 \text{ кОм.}$$

Розрахуємо дільник напруги R1 та R2 так, щоб на вхід АЦП мікроконтролера надходила напруга не вище 3 В.

$$R2 = \frac{U_{R2}}{I_d} = \frac{3}{5 \cdot 10^{-3}} = 0,6 \text{ кОм} \rightarrow R1 = 2 - 0,6 = 1,6 \text{ кОм.}$$

Обираємо резистор $R1 = 1,6$ кОм, а $R2 = 620$ Ом.

Для живлення мікроконтролера, трансивера, підсилювача потужності, датчиків диму, освітлення та температури використовується стабілізатор напруги на базі мікросхеми DA2 KP1158EH3B, яка розрахована на струм навантаження 0,5 А та має вихідну напругу 3 В. Для усунення ВЧ-завад та додаткової фільтрації вихідної напруги рекомендовані наступні номінали конденсаторів:

$$C5 = C4 = C7 = 100 \text{ нФ};$$

$$C6 = 10 \text{ мкФ}.$$

3.3 Розрахунок смугового LC-фільтру

Для виділення з ефіру необхідного радіочастотного каналу на вході мікросхеми-підсилювача CC2590 підключений смуговий фільтр.

Для розрахунку фільтра задаємо наступні умови:

- f_{c1} та f_{c2} – перша та друга частоти зрізу. В даному випадку $f_{c1} = 2445$ МГц, $f_{c2} = 2455$ МГц (рис.3.4). В смузі пропускання фільтра також знаходиться частина спектру сусідніх каналів, яка відфільтрується далі ФНЧ перед АЦП в мікросхемі CC2520. Така реалізація обрана через те, що схема СФ високого порядку набагато складніша, ніж ФНЧ.

- f_{s1} та f_{s2} – частоти гарантованого загасання. Обираємо $f_{s1} = 2430$ МГц, $f_{s2} = 2470$ МГц;

- нормована частота $\Omega = \frac{f_{s2} - f_{s1}}{f_{c2} - f_{c1}} = \frac{40}{10} = 4$;

- умова $f_{c1} \cdot f_{c2} = f_{s1} \cdot f_{s2}$ наближено виконується;

- a_c , дБ – нерівномірність АЧХ в смузі пропускання (обираємо на основі графіків [21]);

- a_s , дБ – гарантоване загасання. Даний параметр визначається на основі відношення сигнал/шум першого каскаду підсилювача трансивера. В цьому випадку сигнали в діапазоні менше f_{s1} та більше f_{s2} матимуть рівень менший за рівень власних шумів підсилювача;

- R_H , Ом – опір навантаження. Вихідний опір мікросхеми CC2590 $R_H = 50$ Ом.

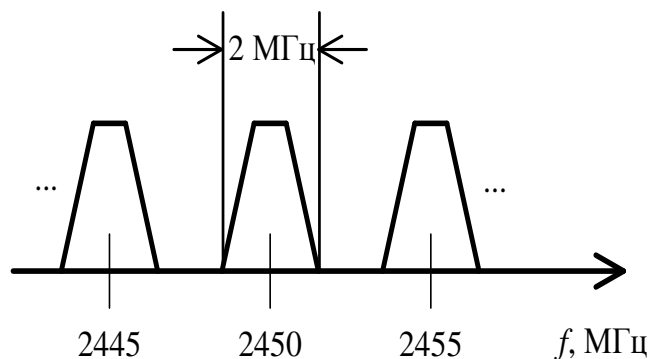


Рисунок 3.4 – Частотний розподіл каналів мережі ZigBee

Розрахуємо відношення сигнал/шум на основі потужності сигналу, який наводиться в антені та коефіцієнту шуму першого каскаду підсилювача трансивера. Розрахунок сигналу на вході антени проведемо за спрощеною формулою (без врахування особливостей місцевості та антени), враховуючи, що вихідна потужність передавача мікросхеми CC2520 дорівнює $P_1 = -18...+5$ дБм (обираємо середнє значення $P_1 = -11,5$ дБм) та мінімальну відстань роботи модуля $d = 100$ м (власне для цього і використовується підсилювач потужності):

$$P_{2[\text{дБм}]} = P_{1[\text{дБм}]} + 20\lg\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) - 20\lg d = -11,5 + 20\lg\left(\frac{0,122}{4\pi}\right) - 20\lg 100 \approx -58 \text{ дБм.}$$

Потужність шумів підсилювача CC2590, приведена до входу дорівнює:

$$P_u = k\Delta f T_0 (F - 1),$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – стала Больцмана;

Δf – смуга пропускання приймального тракту ($f_{c2} - f_{c1} = 10$ МГц);

F – коефіцієнт шуму підсилювача CC2590. $F = 4,6$ дБ = 2,88;

T_0 – абсолютна температура. $T_0 = 293^\circ\text{K}$.

$$P_{ш} = k\Delta f T_0 (F - 1) = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 293 \cdot (2,88 - 1) = 1,52 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} = -101 \text{ дБм}.$$

Відношення сигнал/шум дорівнює:

$$S/N = P_2 - P_{ш} = -58 + 101 = 43 \text{ дБм} = 13 \text{ дБ}.$$

Оскільки в смузі частот гарантованого загасання знаходиться значна кількість сусідніх каналів, а відношення сигнал/шум невелике, то можна обрати більший рівень гарантованого загасання $a_s = 25 \dots 30 \text{ дБ}$.

На основі графіків [21] та значень Ω і a_s обираємо фільтр Чебишева 4 порядку з нерівномірністю в смузі пропускання $a_c = 0,011 \text{ дБ}$.

Далі розраховуємо елементи фільтру згідно методики [21]:

1. Середня геометрична частота дорівнює:

$$f_0 = \sqrt{f_{c1} \cdot f_{c2}} = \sqrt{2445 \cdot 2455} \approx 2450 \text{ МГц},$$

2. Обчислюємо нормовані коефіцієнти K_L та K_C

$$K_{L[\text{мкГн}]} = \frac{R_{\text{н}}}{2\pi f_{0[\text{МГц}]}} = \frac{50}{6,28 \cdot 2450} = 0,00325 \text{ мкГн} = 3,25 \text{ нГн};$$

$$K_{C[\text{пФ}]} = \frac{1}{2\pi f_{[\text{МГц}]} R_{\text{н}}} = \frac{1}{6,28 \cdot 2450 \cdot 50} \approx 1,3 \cdot 10^{-6} = 1,3 \text{ пФ};$$

3. Обчислюємо коефіцієнт перетворення ширини смуги пропускання

$$K_A = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{2450}{10} = 245;$$

4. Використовуючи нормовані значення елементів (табл. 3.1) та формули перетворення ФНЧ-прототипу в смуговий фільтр [21] розраховуємо значення елементів фільтра. Схема фільтра наведена на рис. 3.6, а схема ФНЧ-прототипу на рис. 3.5.

Таблиця 3.1 – Значення елементів фільтра Чебишева при $a_c = 0,011$ дБ

n	$C_{1н}$	$L_{2н}$	$C_{3н}$	$L_{4н}$
4	0,6349	1,203	1,203	0,6349

$$C_1 = K_A \cdot K_C \cdot C'_{1н} = 245 \cdot 1,3 \cdot 0,6349 = 202,095 \text{ пФ};$$

$$L_1 = \frac{K_L}{K_A \cdot C'_{1н}} = \frac{3,25}{245 \cdot 0,6349} = 0,02088 \text{ нГн};$$

$$C_2 = \frac{K_C}{K_A \cdot L'_{2н}} = \frac{1,3}{245 \cdot 1,203} = 0,004408 \text{ пФ};$$

$$L_2 = K_A \cdot K_L \cdot L'_{2н} = 245 \cdot 3,25 \cdot 1,203 = 957,318 \text{ нГн};$$

$$C_3 = K_A \cdot K_C \cdot C'_{3н} = 245 \cdot 1,3 \cdot 1,203 = 382,9276 \text{ пФ};$$

$$L_3 = \frac{K_L}{K_A \cdot C'_{3н}} = \frac{3,25}{245 \cdot 1,203} = 0,01102 \text{ нГн};$$

$$C_4 = \frac{K_C}{K_A \cdot L'_{4н}} = \frac{1,3}{245 \cdot 0,6349} = 0,00835 \text{ пФ};$$

$$L_4 = K_A \cdot K_L \cdot L'_{4н} = 245 \cdot 3,25 \cdot 0,6349 = 505,2384 \text{ нГн}.$$

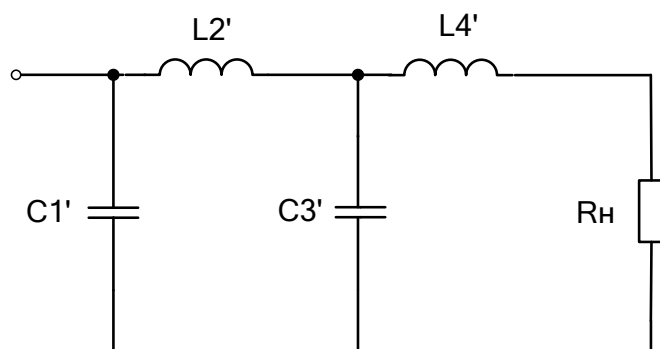


Рисунок 3.5 – Схема ФНЧ-прототипу

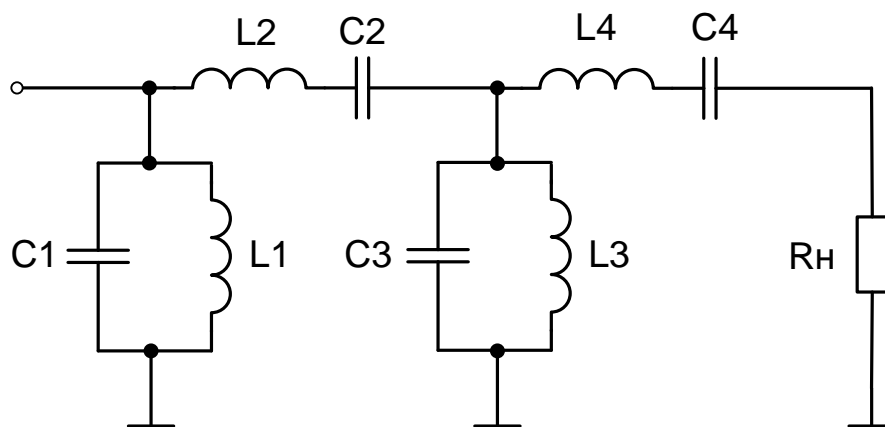


Рисунок 3.6 – Схема смугового фільтру

За допомогою програми NI Multisim 10.1 побудовані АЧХ та ФЧХ отриманого фільтру в смузі пропускання та в смузі гарантованого загасання. Отримані графіки наведені на рис. 3.7 та 3.8.

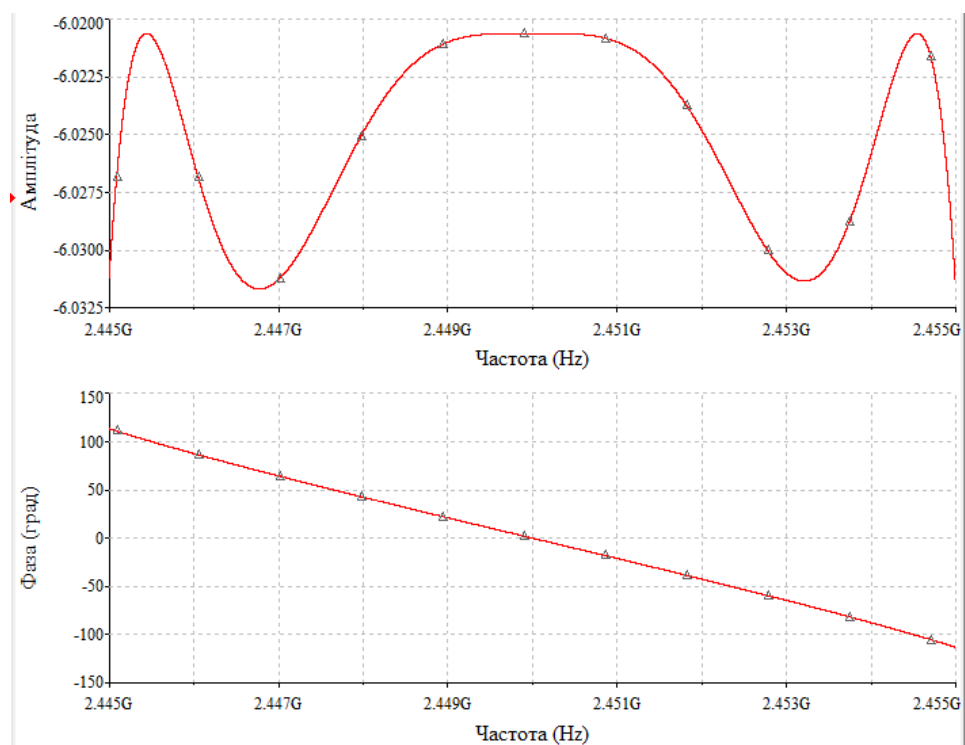


Рисунок 3.7 – АЧХ та ФЧХ фільтру в смузі пропускання

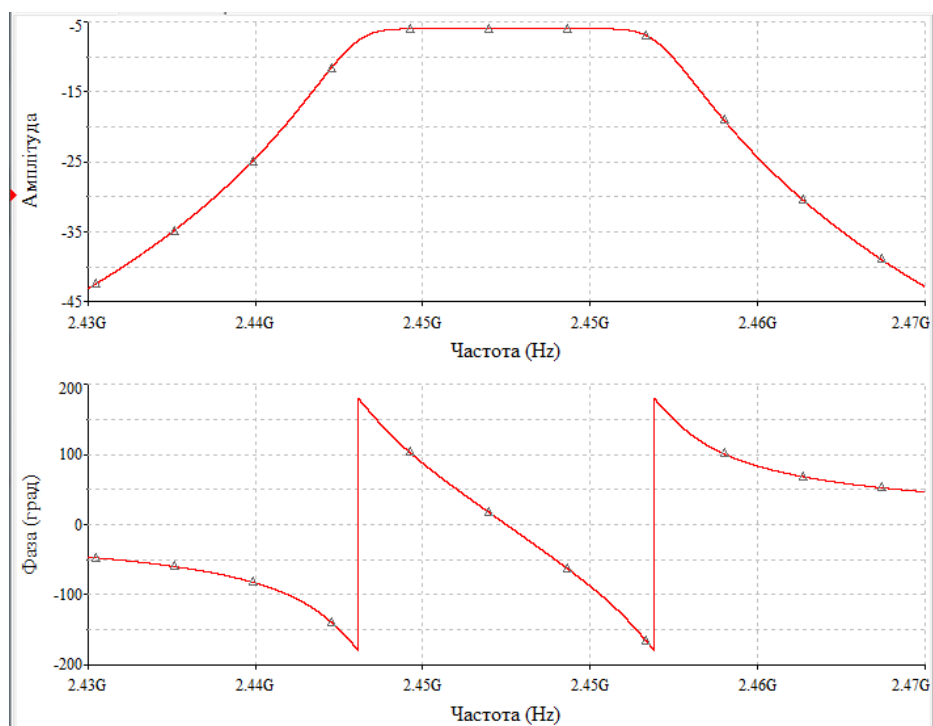


Рисунок 3.8 – АЧХ та ФЧХ фільтру в гарантованого загасання

3.4 Розрахунок підсилювача датчика диму

В якості датчика диму застосовується камера, в якій розміщений ІЧ-світлодіод та ІЧ-фотодіод. В якості ІЧ-світлодіода використовується діод ARL-3014IRAB з наступними параметрами:

- $U_{пр.} = 1,2...1,5$ В;
- $I_{пр.} = 0,02$ А;
- $\lambda_{випр.} = 940$ нм.

Для перетворення ІЧ-сигналу використовується високочутливий ІЧ-фотодіод КДФ111А1, призначений для застосування в датчиках диму з наступними потрібними для розрахунку параметрами:

- фотострум $I_{ф} = 5$ мкА;
- спектральний діапазон 700...1000 нм;
- темновий струм $I_{т} < 10$ нА;
- ємність діода $C_{д} < 70$ пФ.

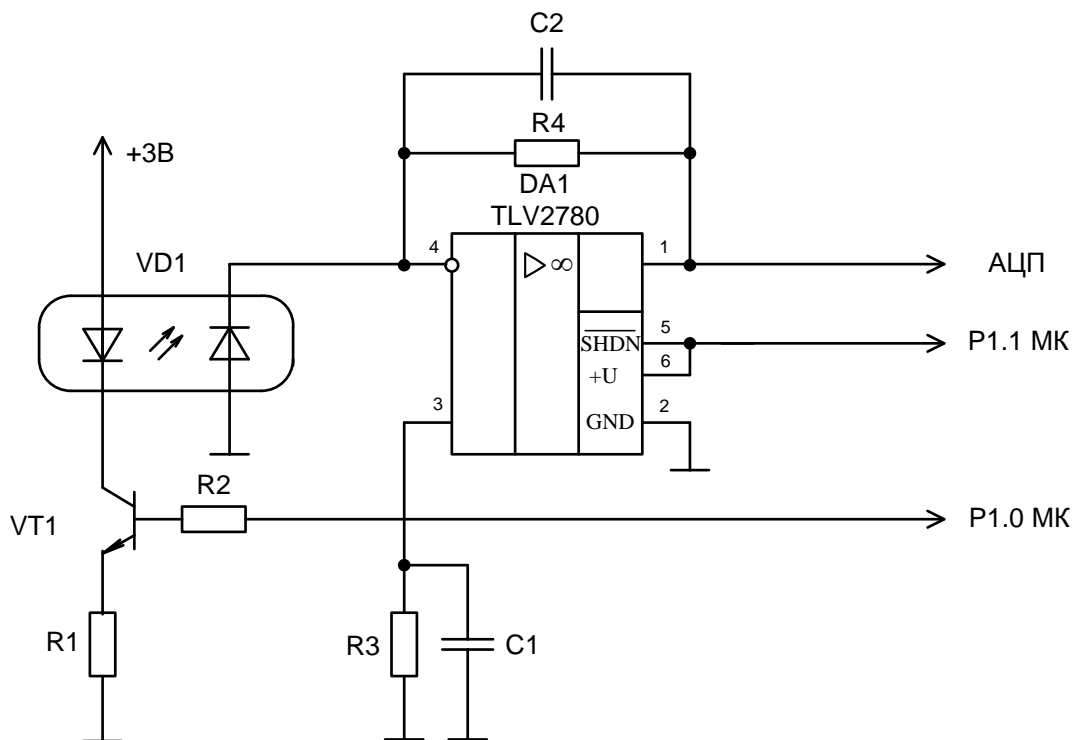


Рисунок 3.9 – Принципова схема підсилювача сигналу фотодіода

Транзистор VT1 призначений для управління світлодіодом. Для уніфікації обираємо транзистор КТ315Б. Розрахуємо номінал резистора R1 з урахуванням того, що напруга на відкритому транзисторі $U_{к-е} = 0,4$ В

$$R_1 = \frac{U_{жив} - U_{пр.} - U_{к-е}}{I_{пр.}} = \frac{3 - 1,2 - 0,4}{0,02} = 70 \text{ Ом.}$$

Обираємо стандартне значення резистора $R_1 = 68$ Ом. Для обмеження струму бази резистор R2 приймаємо 10 кОм.

Підсилювач TLV2780 ввімкнений за схемою перетворювача “струм-напруга”. Струм фотодіода фактично не протікає через входи ОП. Сигнал датчика проходить через резистор R4 та створює на ньому падіння напруги. Чим більший опір резистора, тим вищий коефіцієнт підсилення. Але при значному опорі резистора R4 він починає давати значний температурний дрейф напруги через температурний коефіцієнт вхідного струму підсилювача. Щоб компенсувати дану

похибку, до неінвертуючого входу підсилювача підключається резистор R3 з таким же опором, як і R4 (рис. 3.9) [1] та додають ємнісну розв'язку для притлумлення значної частини його шуму.

Розрахуємо значення резистора R4. Оскільки підсилювач має входи та виходи типу Rail-to-Rail, то падіння напруги на елементах ОП немає, тому опір резистора R4 дорівнює:

$$R4 = U_{\text{вих.макс.}}/I_{\text{ф.}} = 3/5 \cdot 10^{-6} = 600 \text{ кОм.}$$

Обираємо резистор меншого номіналу, щоб не перевантажувати підсилювач.
 $R4 = R3 = 560 \text{ кОм.}$

Ємність конденсатора C2 розраховується за формулою [8]:

$$C_2 = \sqrt{\frac{C_d}{2\pi R_4 f_1}},$$

де f_1 – частота одиничного підсилення ОП (для TLV2780 $f_1 = 8 \text{ МГц}$).

$$C_2 = \sqrt{\frac{C_d}{2\pi R_4 f_1}} = \sqrt{\frac{70 \cdot 10^{-12}}{2\pi \cdot 560 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^6}} = 1,577 \text{ пФ.}$$

Обираємо ємність C2 = 1,5 пФ. Ємність конденсатора C1 обирається в межах 100 нФ.

3.5 Розрахунок двокаскадного підсилювача датчика руху

Для розрахунку підсилювача використаємо наступні вхідні дані:

- $U_{\text{вх.ном.ампл.}} = 1 \text{ мВ}$; $U_{\text{вх.макс.ампл.}} = 4,3 \text{ мВ}$ (параметри датчика IRA-E710ST1);
- $\Delta f = 1 \dots 10 \text{ Гц}$;

– $U_{\text{жив.}} = 5 \text{ В};$

Принципова схема підсилювача наведена на рис. 3.10.

Розрахунок проводимо за методикою [25].

1) Резистор $R1 = 100 \text{ кОм}$ обираємо за рекомендацією виробника датчика. Він є навантаженням каскаду зі спільним витоком мікросхеми IRA-E710ST1. Резистор $R2$ визначає вхідний опір підсилювача. Обираємо його в 10 разів більшим, ніж $R1$. Вхідний опір ОП LM358 дорівнює близько 30 МОм , тому можливо взяти резистор $R2 = 1 \text{ МОм}$.

2) Для уникнення перевантаження підсилювача в перший каскад введено обмежувач на діоді Шоткі 30BQ015 з напругою падіння $0,3 \text{ В}$. З урахуванням падіння напруги на елементах мікросхеми $\pm 1 \text{ В}$ обираємо розмах вихідної напруги підсилювача 3 В . Тоді коефіцієнт підсилення 2 каскаду дорівнюватиме:

$$K_2 = U_{\text{вих.макс.2}} / U_{\text{вх.макс.1}} = 3 / 0,3 = 10,$$

де $U_{\text{вих.макс.2}}$ – максимальна напруга на виході 2 каскаду;

$U_{\text{вх.макс.1}}$ – максимальна напруга на вході 2 каскаду.

Обчислимо загальний коефіцієнт підсилення двох каскадів. Для нормальної роботи АЦП мікроконтролера і детектування сигналу достатньо амплітуди 1 В на вході МК. Тоді загальний коефіцієнт підсилення дорівнює:

$$K_{\text{заг.}} = U_{\text{ампл.вих}} / U_{\text{вх.ном.ампл}} = 1 / 0,001 = 1000.$$

Коефіцієнт підсилення 1 каскаду дорівнює:

$$K_1 = K_{\text{заг.}} / K_2 = 1000 / 10 = 100.$$

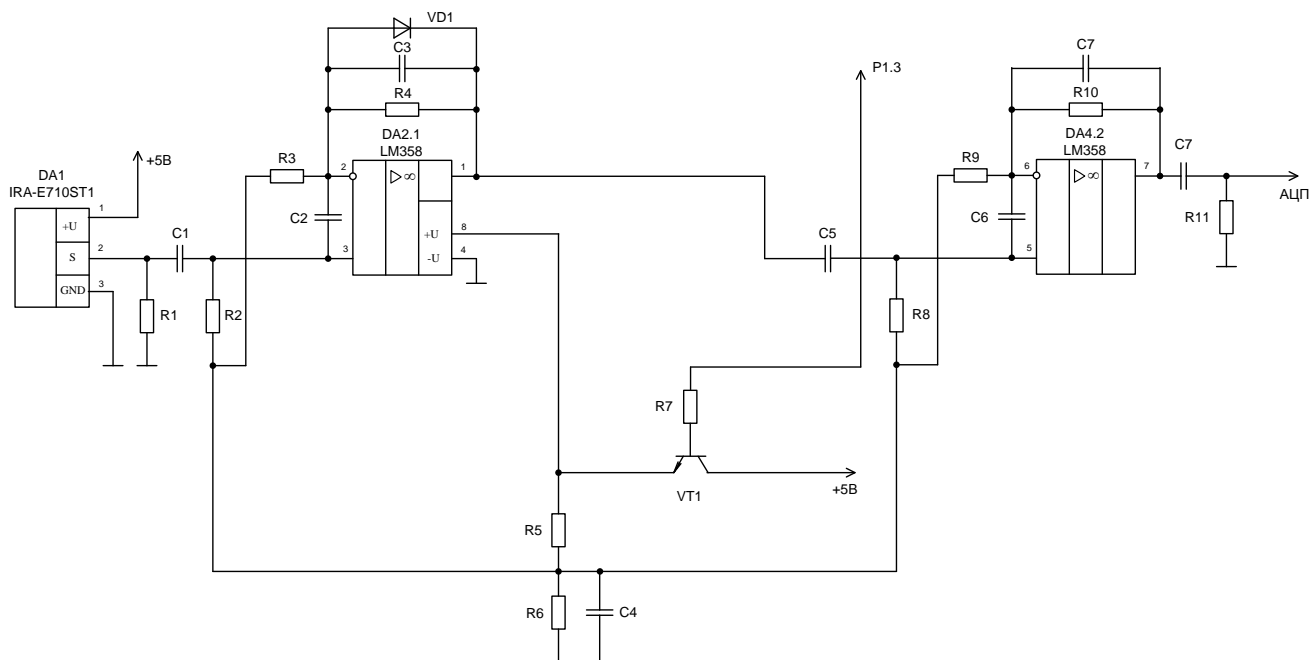


Рисунок 3.10 – Принципова схема двокаскадного підсилювача датчика руху

Таким чином, якщо на виході датчика з'явиться максимальний сигнал з амплітудою 4,3 мВ, то на виході 1 каскаді встановиться сигнал з розмахом 0,86 В, але він буде обмежений по рівню 0,3 В (підсилювач живиться від однополярної напруги). Якщо вхідний сигнал дорівнюватиме 1 мВ, то на виході 1 каскаду розмах напруги буде 0,2 В. Обмеження сигналу не призводить ні до яких спотворень, адже фактично МК визначає рівень напруги і, якщо вона дорівнює максимально можливій, то це означає спрацювання датчика.

Обчислимо роздільний конденсатор C_1 з урахуванням того, що сигнал датчика низькочастотний $\Delta f = 1 \dots 10$ Гц:

$$C_1 \geq \frac{1}{2\pi f_n R_4} = \frac{1}{6,28 \cdot 1 \cdot 10^6} \approx 159 \text{ нФ}.$$

Обираємо ємність $C_1 = 160$ нФ. Конденсатори C_2, C_3, C_6, C_7 призначені для забезпечення стійкості ОП. Їх рекомендовано обирати рівними 2,2 нФ.

Обчислюємо опори резисторів зворотнього зв'язку. Задаємо значення резисторів $R_3 = 1 \text{ кОм}$, $R_9 = 10 \text{ кОм}$. Тоді R_4 та R_{10} дорівнюють:

$$R_4 = (K_1 - 1) \cdot R_3 = (100 - 1) \cdot 1 = 99 \text{ кОм};$$

$$R_{10} = (K_1 - 1) \cdot R_9 = (10 - 1) \cdot 10 = 99 \text{ кОм}.$$

Обираємо $R_4 = R_{10} = 100 \text{ кОм}$. Для уніфікації обираємо $R_8 = R_2 = 1 \text{ МОм}$; $C_5 = C_1 = 160 \text{ нФ}$.

Транзистор VT1 призначений для управління підсилювачем від МК. Коли датчик вимкнений, живлення на підсилювач не надходить. В якості транзистора VT1 обираємо КТ342Б, у якого падіння напруги $U_{к-е} = 0,1 \text{ В}$ у відкритому стані. Резистор R_7 обираємо, як і раніше рівним 10 кОм .

Резистори R_5 та R_6 формують дільник напруги, призначений для однополярного живлення мікросхеми. Для його розрахунку обчислимо сумарний струм входів ОП, підключених до резистора R_6 . Згідно з довідкових даних на ОП LLM358 $I_{вх.} = 150 \text{ нА}$. Оскільки до дільника підключено 4 входи мікросхеми, то

$$I_{вх.сум.} = 4I_{вх.1} = 600 \text{ нА}.$$

Струм дільника дорівнює:

$$I_{д.} \geq 10 \cdot I_{вх.сум.} = 6 \text{ мкА}.$$

Опори резисторів R_5 та R_6 дорівнюють:

$$R_5 = R_6 = \frac{U_{жив.} - U_{к-е}}{2 \cdot I_{д.}} = \frac{5 - 0,1}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-6}} \approx 408 \text{ кОм}.$$

Обираємо резистори опором 390 кОм .

Обчислимо ємність конденсатора C_4 :

$$C_4 \geq \frac{1}{2\pi f_H R_6} = \frac{1}{6,28 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 10^3} \approx 408 \text{ нФ}.$$

Обираємо ємність 390 нФ. При обчисленні ємностей конденсаторів фільтрів нерівномірність частотної характеристики не була задана, оскільки для даного типу підсилювача це не потрібно.

Параметри C7 та R11 такі ж, як C5 та R8.

Висновки до розділу 3:

Розраховано високочастотний генератор датчика вологості, DC/DC перетворювача, смугового LC-фільтру, підсилювача датчика диму та двокаскадного підсилювача датчика руху. Проведено вибір елементної бази згідно з проведеними розрахунками. Для збільшення дальності зв'язку рекомендовано використовувати не стандартну антену, а антену збільшеної потужності. Для забезпечення надійного зв'язку між вузлами без перешкод доцільно підвищити потужність передавачів.

Розроблено схему електричну принципову для модуля управління мікрокліматом теплиці, яка зображена у додатку В.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Проаналізовано та подано у вигляді таблиць [25]:

- зміст ідеї (що пропонується);
- можливі напрямки застосування;
- основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування);
- чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Побудова системи моніторингу навколишнього середовища промислового об'єкту	Створення мережі для управління промисловим об'єктом	Використання енергоефективної мережі, яка об'єднує сенсори, пристрої та прилади в єдину систему
	Моніторинг параметрів середовища об'єкта	Дистанційне відстеження показників середовища за допомогою комп'ютера, планшета чи смартфона
	Контроль та управління віддаленими вузлами системи	Можливість зручного віддаленого управління системою чи окремими її елементами

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг порівняно з пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик;
- визначення попереднього кола конкурентів або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проведення збору інформації щодо

значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів конкурентів;

- проведення порівняльного аналізу показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Визначення характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	W	N	S
1	Економічні	900 у. о.	3000 у. о.	5000 у. о.	-	-	+
2	Призначення	Автоматизація і дистанційний контроль клімату промислової теплиці теплиці	Програмований контроль клімату промислової теплиці теплиці	Автоматизація і дистанційний контроль клімату промислової теплиці теплиці	-	+	-
3	Надійності	Висока надійність	Висока надійність	Висока надійність	-	+	-
4	Технологічні	Потребує фахівця для монтажу та налаштування	Потребує фахівця для монтажу та налаштування	Потребує фахівця для монтажу та налаштування	-	+	-
5	Ергономічні	Зручна при використанні	Зручна при використанні	Зручна при використанні	-	+	-
6	Органолеп.	-	-	-	-	+	-
7	Естетичні	Інтуїтивно зрозумілий зовнішній вигляд	Зручний та зрозумілий	Зручний та зрозумілий	-	+	-
8	Транспортування	Об'ємна упаковка	Об'ємна упаковка	Об'ємна упаковка	-	+	-

№ п/п	Техніко- економічні характерист ики ідеї	Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	W	N	S
9	Екологічності	Не шкідливий	Не шкідливий	Не шкідливий	-	+	-
10	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно	-	+	-

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкуренто спроможності.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл.4.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту;
- чи існують такі технології чи їх потрібно розробити/допрацювати;
- чи доступні такі технології авторам проекту.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Побудова системи для моніторингу та контролю параметрів середовища промислового об'єкту	Мікроконтролери	Наявні	Доступно
		Модулі датчиків	Наявні	Доступно
		Антени	Наявні	Доступно
		Програмне забезпечення	Потребує розробки	Доступно
		Модулі ZigBee	Наявні	Доступно
Обрана технологія ідеї проекту: Програмне забезпечення				

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	2
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	4000
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6.	Середня норма рентабельності в галузі або по ринку, %	150%

Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку) порівнюється із банківським відсотком на вкладення. За результатами попереднього оцінювання ринок є привабливим для входження.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Після визначення потенційних груп клієнтів проведений аналіз ринкового середовища: складені таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. №№ 4.6...4.7). Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Автоматизація процесів промислових теплиць	Сільське господарство, фермерство	Потреба в надійності, простота експлуатації	Товар має забезпечувати необхідний функціонал. Компанія має надавати початкове налаштування та підтримку

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємним тому потрібні люди з певними навичками	Пошук персоналу у навчальних закладах даного спрямування
2.	Потреба в ресурсах	Для створення продукту потрібне технічне забезпечення та певні умови для тестування працездатності	Укладання договорів з комерційними структурами для фінансування та надання можливостей для тестування продукту

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Спонукає розробляти і виробляти нові продукти, знижувати витрати їх виробництва і вартість	Масштабування структури та збільшення функціональності товару
2.	Попит	Існування стійкого попиту означає, що більшість клієнтів зацікавлені у введенні інновацій	Рекламна діяльність, просування товару у інтернеті та на тематичних заходах

Надалі проведений аналіз пропозиції: визначені загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8)

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції олігополія	На ринку присутня невелика кількість фірм, які займаються побудовою систем моніторингу параметрів середовища промислових теплиць	Підвищувати якість товару, функціональність та енергоефективність
2. За рівнем конкурентної боротьби національний	Місцезнаходження фірм не обмежується територіально; офіси розміщено у різних містах	Створювати веб-ресурсу компанії
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними виробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують аналоги, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо	Аналізувати продукцію конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати якість товару та його функціональність
5. За характером конкурентних переваг цінова	Передбачає продаж продукції за більш низькими цінами, ніж конкуренти.	Продавати товар за низькою ціною.
6. За інтенсивністю марочна	Боротьба носить не виражений марочний характер, значення бренду не велике	Реклама товару, створення впізнаваної символіки продукту

Після аналізу конкуренції проведений більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера) (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	"ЭКО ТЕПЛИЦА" "T-LUX" "Мій проект"	Немає	Виробники тепличних систем	Вимоги до якості (зручність користування та багатий функціонал)	Замінників немає
Висновки:	Інтенсивність досить висока	Немає	Є певна залежність від постачальників	Товар має бути якісним, надійним та дешевим	Обмежень немає

Для того, щоб бути конкурентоспроможним на ринку для розробки товару потрібно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі схемотехніки та програмування.

На основі аналізу конкуренції, наведеного в табл. 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 4.6-4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 4.10.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1.	Ступінь задоволення потреб користувача	Продукт має мати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для управління та моніторингу, щоб персонал міг без зайвих зусиль використовувати обладнання
2.	Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	Продукт має працювати стабільно
3.	Наявність наукових ресурсів	Для створення високоякісного та стабільно працюючого обладнання потрібні інженери
4.	Економічний	Ціна товару має бути нижча ніж у конкурентів для пошуку потенційних купців та сформування іміджу фірми

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бал и 1-20	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Ступінь задоволення потреб користувача	15						+	
2.	Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	20					+		
3.	Наявність наукових ресурсів	15			+				
4.	Економічний	20	+						

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз

щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: економічна (ціна товару).	Слабкі сторони: ступінь задоволення потреб користувача, якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності.
Можливості: знижувати витрати на виробництво продукції, покращувати якість продукту; формування попиту у користувачів за рахунок маркетингової діяльності.	Загрози: пошук людей з необхідними навичками та знаннями, запропонувати вигідні умови для співпраці; технічне забезпечення та умови для тестування працездатності продукту.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 4.9, аналіз потенційних конкурентів). Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13). Обрано альтернативу № 1.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка обладнання, створення реклами, взаємодія з покупцями для перевірки працездатності обладнання	80%	1 рік
2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, створення обладнання, тестування	60%	2 роки

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Сільське господарство	Готові	Низький	Середня	Середня
2.	Фермерство	Готові	Високий	Середня	Середня
Які цільові групи обрано цільову групу №1 та №2.					

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку *
1.	1	За рахунок великих можливостей по об'ємах збуту товарів, укладених договорів на постачання і продуктивності підприємство може добитися менших витрат	Витрати на виробництво	Стратегія лідерства на витратах

№ п/п	Обрана альтерна тива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентос проможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку *
2.	2	Надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару бути реальним або уявним.	Формування попиту у користувачів за рахунок спеціального функціоналу та високої якості товару	Стратегія диференціації

Обрано стратегію диференціації. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект "першопро хідцем" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Ні	Так	Так, основний функціонал	Наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (табл. 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.17). що полягає у формуванні

ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Товар має забезпечувати необхідний функціонал, початкове налаштування та підтримку	Диференціації	Низька ціна, простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс управління, базовий функціонал	Оптимальне співвідношення ціна/якість, наукоємність, співпраця

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.18 наведені результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Можливість масштабування та збільшення функціоналу	Побудова на основі існуючої мережі	Простота у роботі
2.	Надійність	Використання надійних модулів та обладнання	Стабільність роботи

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.19).

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Багатоканальна аудіо система побудована на основі мережного обладнання		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Низька ціна 900 у.о.	М	
	2. Сумісність з більшістю обладнання	М	
	3. Можливість масштабування системи	М	
	3. Висока надійність	М	
	4. Безпечність для користування	М	
	Якість: стабільна робота та багатий функціонал		
	Пакування: об'ємна коробка		
	Марка: "Мій проект"		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія		
	Після продажу доставка, обслуговування, налаштування.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист інтелектуальної власності			

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари- замінники	Рівень цін на товари- аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	—	3000...6000 у.о.	30000 у.о. і вище	800 – 1000 у.о.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення. Так як налаштування обладнання у кінцевого користувача потребує певних професійних навиків від персоналу і обладнання налаштовується під кожного клієнта індивідуально, то збут доцільно проводити власними силами без застосування посередників.

Висновки до розділу 4:

На сьогодні автоматизовані системи моніторингу та контролю параметрів середовища промислових теплиць є дуже перспективним напрямом розвитку. Застосування мережних технологій ZigBee для таких систем дозволяє легко масштабувати уже існуючу мережу та розширити спектр її функціональності за допомогою додаткового обладнання, що є великою перевагою. Нині сільське господарство є потенційним споживачем, який планує в перспективі залишатися сучасним розглядають запровадження автоматизованих систем у свої робочі процеси, тому безперечно існує можливість ринкової комерціалізації проекту, бо в майбутньому прогнозується лише зростання ринку в цій галузі.

Український ринок зараз має середню конкуренцію в даному напрямі, так як він лише починає розвиватися. Аналоги мають високу вартість, значну частину якої складає вартість послуги налаштування та наступної технічної підтримки.

Для впровадження доцільно обрати альтернативу дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка обладнання, реклами, взаємодія з покупцями для перевірки працездатності обладнання. Подальше виконання проекту безперечно є доцільне.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи була спроектована безпроводова мережа для управління інженерними системами промислового об'єкту, а також модуль-координатор для контролю клімату систем теплиць і сигналізації. Попередньо був проведений аналіз існуючих методів реалізації пристрою, спроектована функціональна та принципова схеми.

В результаті виконання дисертації були зроблені наступні висновки:

1. Технологія ZigBee займає раніше відсутній тип радіоінтерфейсів, замість якого використовували системи і технології з більш високими технічними характеристиками і, відповідно, більш дорогі. Дана технологія споживає незначну кількість енергії та має малу швидкість передавання даних, що ідеально підходить для мереж безпроводових сенсорів. Мережа підтримує багатокоміркову структуру, що дозволяє обирати оптимальні шляхи передавання даних. Для реалізації енергоефективної мережі доцільно використовувати мікроконтролер MSP430F2618.

2. Перевагами мережі є завадостійкість від технологій Bluetooth і WiFi, які працюють в тому ж діапазоні частот, а також значно менша величина потужності, що випромінюється в навколишній простір. Серед недоліків технології потрібно відзначити невеликий радіус дії та малий вибір компонентної бази. Для збільшення радіусу дії доцільно використовувати антену зі збільшеною потужністю.

3. При створення пристрою, що містить декілька датчиків рекомендовано використовувати окремий мікроконтролер додатків та окремий трансивер. Конфігурацію доріжок друкованої плати з НВЧ-елементами необхідно брати з опису виробника мікросхеми. Для зменшення навантаження центрального координатора рекомендовано використовувати змішану топологію мережі.

4. Для збільшення строку служби батарей потрібну напругу живлення слід формувати DC/DC-перетворювачем. Також потрібно передбачити вимикання підсилювачів сигналу датчиків, коли вимірювання параметрів не проводиться.

5. Застосування мережевих технологій ZigBee для автоматизованих систем моніторингу та контролю параметрів середовища промислових теплиць дозволяє легко масштабувати уже існуючу мережу та розширити спектр її функціональності за допомогою додаткового обладнання. Для впровадження ідеї стартап-проекту слід дослідити поведінку потенційного споживача, знайти необхідні наукові ресурси, розробити обладнання, провести рекламну компанію.

Задачі, поставлені на початку роботи, були виконані. Робота виконана у відповідності з державним стандартом.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Пантелейчук А. Использование микроконтроллера MSP430F2012 в малопотребляющем датчике дыма / А. Пантелейчук. – М. : Новости электроники, 2007. – №14. – с. 18-21.
2. Соколов М. Программно-аппаратное обеспечение беспроводных сетей на основе технологии ZigBee/802.15.4 / М. Соколов. – К. : Электронные компоненты, 2004. – №12. – с. 80-87.
3. Скуснов А. ZigBee: обзор технологи / А. Скуснов. – М. : Компоненты и технологии, 2005. – № 3.
4. Калачев А. Беспроводные приложения: план действий, компоненты Texas Instruments – и вперед! / А. Калачев. – М. : Новости электроники, 2011. – №4. – с. 12-19.
5. Панфилов Д. Введение в беспроводную технологию ZigBee стандарта 802.15.4 / Д. Панфилов, М. Соколов. – К. : Электронные компоненты, 2004. – №12. – с. 73-79.
6. Пушкарев О. CC2480 – сетевой ZigBee сопроцессор / О. Пушкарев. – М : Новости электроники, 2008. – №14. – с. 32-36.
7. Пушкарев О. CC2520 – новый ZigBee-трансивер для экстремальных условий эксплуатации / О. Пушкарев. – М : Новости электроники, 2008. – №15. – с. 15-18.
8. Хоббс Ф. Усилители для фотодиодов на операционных усилителях / Ф. Хоббс. – М. : Компоненты и технологии, 2009. – №2. – с. 46-50; №3. – с. 46-50.
9. Нестеров В. Применение расширителей дальности CC2590-91 от компании Texas Instruments / В. Нестеров. – К. : Электронные компоненты, 2009. – №2. – с. 50-52.
10. Faludi R. Building Wireless Sensor Network / R. Faludi. – Cambridge : O'Reilly, 2011. – p. 321.
11. ZigBee Specification : ZigBee Alliance, 2005. – p.375.
12. Jennic. Application Node: JN-AN-1035. Calculating 802.15.4 Data Rate / Jennic. –

- NXP Semiconductors N.V., 2006. – p. 8.
13. Беспроводные сети ZigBee и IEEE 802.15.4 [URL] –
<http://book.itep.ru/4/41/zigbee.htm>
 14. Гринченко С. Использование технологии ZigBee в беспроводной охранной системе загородного коттеджного участка / С. Гринченко. – М : ТелеМультиМедиа, 2009. – №5.
 15. Протокол ZigBee: управляйте светодиодными светильниками по беспроводной сети [URL] –
http://tatled.ru/Управление_светодиодным_освещением_ZigBee
 16. Система управления светильниками ZigBee [URL] –
<http://www.led.esso39.ru/zigbee.php>
 17. Подробное описание интерфейса I2C [URL] –
<http://www.radioham.ru/teory/I2C.htm>
 18. Последовательный интерфейс SPI [URL] –
<http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/interface/spi/index.htm>
 19. Новицкий А. Синхронный последовательный интерфейс в микроконтроллерах от “А” до “Я” / А. Новицкий. – М. : Компоненты и технологии, 2009. – № 3.
 20. Квадратурная модуляция со сдвигом OQPSK (Offset QPSK) [URL] –
<http://www.rfdesign.ru/index.php/2009-11-16-21-54-14/207-oqpsk.html>
 21. Ханзел Г.Е. Справочник по расчету фильтров / Г.Е. Ханзел. – США, 1969 ; [пер. с англ., под ред. А. Е. Знаменского. М.]. – М. : “Сов. радио”, 1974. – 288 с. с ил.
 22. Б. С. Гершунский. Справочник по расчету электронных схем / Б. С. Гершунский. – К. : Вища школа, 1983. – 240 с.
 23. Средство экономии электроэнергии в освещении [URL] –
<http://e2e.ti.com/ru/forums/t/339.aspx>
 24. Семенов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б. Ю. Семенов. – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 334 с.
 25. Розроблення стартап-проекту [URL] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За

заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

26. ДСТУ 3008:2015. Національний стандарт України: Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки, структура і правила оформлювання, Київ – 2016.

Додаток А

“ Система моніторингу параметрів навколишнього середовища
промислового об’єкту ”

Реферат

ABSTRACT

The research object is a wireless network based on ZigBee technology for managing the engineering systems of the industrial greenhouse complex.

The purpose of the work is developing the topology and structural scheme of the wireless network, the choice of components for it, the development of a functional, principal scheme of the climate control module for greenhouses for the network.

The research method is a theoretical study of the possibility of building a wireless network based on ZigBee technology for use in alarm systems, lighting control, climate, etc.

As a result of the master's dissertation, a structural scheme and network topology, a functional and principal scheme of the module for climate control of the greenhouse were developed.

Area of application: the network can be used for creating systems of automated greenhouse complexes, wireless signaling systems, sensor networks.

The wireless technology recently gained widespread use in the life of every human. The use of electromagnetic waves transmitted to information can not only avoid laying cables over long distances, but also for control systems are subject to small sizes (50-100 m) with no need to connect sensors to create signal lines. So you can easily extend the system alarms or telemetry with a large number of sensors, without the need for a large number of wires. Although the distance from the sensor to the main building of the university la network may be small, but significant number of parameters that control, a cable connection is problematic. In this case, wireless networks not only become comfortable, but also save money in creating a system.

The urgency of the development is the automation control systems engineering industrial facilities, based on wireless sensors, a wide dispersion in recent years, wireless technologies in the field of control and telemetry.

The project aims to develop solutions for controlling microclimate volume facilities, the provision of fire and burglar alarm systems, referral data controller parameters of utilities, lighting control and more.

Methods of theoretical development of a wireless network sensor, calculating the required network parameters and sample design node system.

Subject of the research, a wireless network based on ZigBee technology for the management of industrial facilities engineering systems, and the subject on - Principles control, transmission and processing of data in networks of sensors.

The novelty of the work is to develop ZigBee module for managing microclimate of the plant and security systems. PACKAGED SYSTEMS Market is not today.

The practical value lies in the fact that the materials studied are and the system will be used in the project when subject to wireless control or for scientific purposes.

Today the main wireless technology is WiFi and Bluetooth, which were widely used. Accordingly, you can specify the following basic hundred ndarty in wireless networks:

- IEEE 802.11 wireless local area network (WLAN - wireless or local area network);
- IEEE 802.15 Wireless Personal Area Network (WPAN);
- IEEE 802.16 - Broadband Wireless Access (BWA - Broadband Wireless Access).

This paper will become WPAN networks, including the ZigBee network and the new IEEE 802.15.4 standard. Networking standards 802.11 and 802.16 are given here for comparison purposes only.

Wireless Personal Area Network WPAN is a network with a small radius of 15 ... 20 m, and is designed to replace cable connections between their PCs as well as to connect to various Noah peripherals and communication multimedia systems (PDAs, printers, fax machines, Scanner stereo-systems etc.). After the exchange of information between these systems is not high-speed performance data transmission, providing standards-based details WiFi and Bluetooth. They are capable of transmitting large amounts of information (voice, video, data) at high speed (1 to 200 Mbps). This standard version enables the wired connections in devices that we deal with every day (computers, computer networks, etc.) to replace.

But there are many systems (different sensors, the system of collection information etc.) that have specificity, as a result of such applications in impossible efficient use of the above technologies. To implement these tasks, standard IEEE 802.15.4 (ZigBee) has been developed for low-speed WPAN networks.

The next largest competitor is the technology of Bluetooth and ZigBee. Under similar scope - wireless devices domestic and industrial use, including remote controls, computer peripherals and more. But unlike the Bluetooth technology, ZigBee is for applications that require low power consumption. Periods of active devices, developed by the technology ZigBee, can be extremely small, resulting in a long life. In addition, the chip Wi-Fi and Bluetooth are very expensive for organizing on these large networks of different devices on the scale of companies, buildings and so on. 802.15.4 standard allows the development of wireless interfaces with minimal cost, simple circuit, a minimum number of external passive components, software stack, which provided its allocated memory with high efficiency purposes.

Standard allows you to create a network of technology, and somebody thus serves a considerable number of units and increase upstate communication at no extra cost to power amplifiers.

ZigBee technology is designed to transmit large amounts of information, such as Wi-Fi or Bluetooth. But for transmission, such as counters, sensors whose volume rarely exceeds ten bytes do not need high speeds - in this case, not required high energy efficiency, price and reliable performance. Most ZigBee devices work according to the following algorithm: the device is in standby mode almost all the time, providing optimal re-bank energy when you receive new information or get activated in the next session of the device, sending information quickly and transformed then in the power-saving mode. Typical time delay in this is 30 ms for connecting a new device to the network, to 15 ms from standby to active, 15 ms to access the channel. It can increase the life of the batteries to 10 years or more, depending on the type of application and the life of the investment lost workflow, with DC transmission can be 15-30 mA and in standby mode - less than 2 mA. As a result of the delay when calling so small that a person who, for example, comes in the room and presses the switch, without a cable connection, ZigBee, will not even

notice that the light appears almost mandatory coverage level, while the delay connecting from devices to the Bluetooth network from about 3 seconds.

ZigBee technology fully meets all requirements for systems distance control and management of industrial facilities:

- stable reliable two-way communication;
- length of work: 10 m or more;
- operation in license-free frequency band;
- small physical size;
- performance on a single chip;
- low energy consumption;
- price for the end user not more than \$ 5.

ZigBee devices combine the lowest power transmitters with the greatest sensitivity receivers compared to other competitors. This combination results in a significantly positive effect - minimizing the exposure of people who are in the network service area. So ZigBee can be considered as one of the safest environment for today and wireless standards.

ZigBee / 802.15.4 is the only standardized technology, originally developed by the system of monitoring and control, distributed network of sensors, the use of wireless information transmission networks for low-cost low-power systems used in commercial, industrial and domestic automation:

- control lighting (industrial, municipal and domestic);
- industrial and building services (heating, ventilation and conditioning, aids and appliances);
- personal electronics (multimedia, mobile devices), household appliances (washing machines, coffee machines, air conditioners, air filters, etc.);
- PC peripherals: mouse, joysticks, keyboards, gaming devices;
- alarm and security alarm systems, access control system control, contactless switches, sensors smoke, gas, traffic, fire, temperature, pressure, etc.

- equipment medical diagnostics patient monitoring of athletes, biosensors and medical devices;
- remote management and control systems, machine controls, machine tools, industrial equipment, cooling systems, equipment, remote sensing, telemetry;
- monitoring of industrial and port assets, logistics;
- monitoring systems, water, gas and heat, controls and power tool controls, housings (HCS).
- wireless communication devices, radio modems, transmission of audio signals and images;
- automotive electronics (system tire pressure monitoring, alarm, system identification and diagnostics).

Promising field of application is the standard wireless systems impressions of different counters, since there is no need for the monthly belief again. In addition, the technology offers great opportunities for industrial systems different processes. For example, in mining and transportation of oil uses a thousand sensors. Extremely expensive wire from each of them individually signal. Price of a sensor cable could reach \$150, while the price is cheap wireless solution is about \$5.

An example of an information system based on wireless technology can be a system of accounting proof of water meters and electricity house. The system consists of finite autonomous device (microcontroller and ZigBee modem to water meters in each apartment) floor router with network power, which also has inputs for electricity meters and located in the basement of the house controller, which collects data, from all routers and transmits information in cue point channel Ethernet. Installation on each floor of the Route Optimizer allows the system to choose the best way to transmit message and bypass network interference.

The main goal of ZigBee networks is to optimize energy consumption. IT solutions to this problem is a communication strategy based on the data only if they receive a confirmation and the next mode in case of successful receipt of the packet to the receiver. In addition, each device can initiate a new transmission at any time. The obvious

drawback of this method is the likelihood of interference while transmitting data to multiple devices. But the possibility of imposition minimized by extremely short length of the active cycle of the device, the transmission of opportunities and, as a rule, transmit a certain amount of information. The connection with the CSMA-CA protocol.

Or "star" - The strategy of simple multiple access is only used for connections like "point-point". It may not be suitable for all applications. In order to prevent unwanted interactions possible using the protocol sets aqueous access to time management (TDMA). The technology ensures ZigBee / 802.15.4 time intervals based on a similar TDMA technology, but the use of the present split is only with synchronization and temporary second division, which is more complicated and less energy-efficient algorithm compared to the traditional possible TDMA access , Time division based on Zigbee's use of synchronization mode, in which the final network devices, most of the time-fence time are pending, periodically for receiving the synchronization signal from the network coordinator, which devices in the local network cell in white can be activated time by time transferring a database. Coordinator manages the exchange, assigns channels and the appointment of the interval from 15 ms to 252 sec. Transmission of signal packets determines the bandwidth, provides small queue access, and allocates 16 equal-length intervals, each of which excludes collision rate.

The time interval for access is defined for each network node, or co-interns, or using CSMA-CA. The intervals of rest, no need to implement energy-saving network coordinator when working on standalone power source. The downside - pending sync signaling leads to a slight increase in power consumption due to non-fulfillment of large time differences that the device is activated earlier to not miss the signal. Synchronized Access feature is used in networks with advanced topology, such as "cluster tree" and presents a difference in the exchange of information between the coordinator and college LAN network for simple cases, multiple and access with the function of synchronization.

In a simple multi-access using the following mechanism CSMA-CA. When a device wants to transmit with a frame, it waits for you-random time. If the channel is free (passive), stop-delay random length, after which it will transmit data. If the channel is busy after a random time, the device waits for another random time before you can make

another attempt to access the channel. Frames sent without confirmation of the mechanism CSMA-CA.

PAN, with synchronization mechanism with domain access channel CSMA-CA, where domains come to delays at the beginning of packet transmission synchronization. Domains delay of all devices within the PAN cooperation regulated PAN. Whenever a device transfers to data frames during the Access Channel interval (Figure 1.5), it now defines the boundary of those domains for support, and then waits for any number of delay domains. If the channel is busy, there is another delay, the device again waits for a random number of domains with support for before trying again to access the channel. When the channel passivation, the device starts transmission. Staff confirmation link without using the mechanism of the CSMA-CA.

The successful receipt and verification of training data from packets are confirmed. If for any reason the device can not start the same process of incoming frames, the received message is not confirmed.

If the sender does not receive the confirmation within a certain time, he believes that the transmission and not trying to frame the transmission will be repeated. If no confirmation comes after several attempts to transfer, the sender can either complete the session, or try again. As confirmation is required, lawyer believes the transfer is successful.

Architecture ZigBee / 802.15.4 Stack shown in Fig. IEEE 802.15.4 standard defines the level of media access (MAC) and physical layer data dissemination in the environment (PHY), in lower level protocol without wired data transmission. Alliance puts ZigBee software stack level of data link (DLC) on the level of device profiles (ZigBee profiles). Input and data transmission channel is the physical layer PHY, which determines the working frequency range, modulation type, maximum speed, bone, number of channels: O-QPSK - quadrature phase shift keying for a range of 2.4GHz (16 channels, 250 kbps / s), BPSK - Binary Phase Shift Keying for 915 MHz (10 channels, 40 kbit / s) and 868 MHz (1 channel, 20 kbit / s) frequency.

Stage PHY performs the activation / deactivation transceiver, detecting energy reception on the channel, the choice of physical channel frequency, etc. Quality of

communication when receiving the data packet and evaluation of free channels for protocol CSMA-CA (Multiple Access Protocol to the Environment to control and prevent collisions). Standard 802.15.4 - a physical interface (chip transceiver) and ZigBee - a logical network and software stack that provides security features and routing. Next, the structure of the ZigBee stack access control MAC features the MAC level:

- 64 or 16 bit addressing within local area networks. Ways of addressing: ID: ID + ID network device (topology "Star"), sender ID / receiver (a peer node);
- Entry into the network / network, automatic / semi-automatic networking;
- Packet format communication network ZigBee, the most cost-effective Tora compression load a data packet of 104 bytes of data, the maximum length of about seconds to 127 bytes;
- The level of security: Access to Network Access Control List; tie-major to determine delays in the transmission and relevance of data packets, encryption with 128-bit symmetric key AES;
- mechanism for network access, function time period and guaranteed change distance, access distance from protocol CSMA-CA;
- Support network topologies, including the point-to-point, star-type port and cluster topologies;
- The acknowledgment of the receipt of the data packet, Proof of Approval (ACS), 16-bit Error Control (CRC);
- Support 3 classes of devices;
- Packet / stream transmission paths.

All ZigBee network consists of three classes of devices: FFD device router (Full Function Device - a full-featured device), device coordinators (coordinators - FFD with additional system resources, depending on the complexity of the network) and RFD End Devices (Reduced Function Device - a device with a limited set of functions). Every ZigBee network is just a device coordinator. The main task of the coordinator is to set parameters and create a network, choosing the main radio station and providing a unique

network identifier. This coordinator is the most difficult of the three types, the largest amount of memory and is turned on, usually on the network.

Routers are used to extend the range of the network due to their ability to serve as repeaters placed far apart between the devices.

Restricted devices (RFDs) can not serve as coordinators, apply only to the local network coordinator (FFD device), support the connection type "PTP" and "Star", playing the role of the network end -Node.

In practice, most network nodes require RFD devices and the use of FFD devices and the coordinator for bridging the communication or network topology. Once the router and other devices on the network they receive information about that of the coordinator or already involved in a network router and based on the information set their operating parameters in accordance with the characteristics of network. ZigBee Router receives a table of network addresses, which it distributes among those connected with the network terminal requirements. The device uses FFD tree addressing when making decisions about routing. Each router maintains a table consisting of pairs of type DN, where D - is the address, destination and N - address of the next device towards this destination.

As a result of the work has been developed for the wireless network management systems engineering industrial facilities, as well as an example, the module coordinator for greenhouse air conditioning and alarm systems. Previously, analysis of existing methods of the device, designed and functional concept.

As a result of the project, the following conclusions were made:

1. ZigBee Technology takes up previously unrelated type of radio interfaces, which used systems and technologies with higher technical characteristics and, respectively, more expensive. This technology consumes insignificant amounts of energy and has a low data rate, ideal for networks of wireless sensors. The network supports a multicomponent structure that allows you to choose the best ways to transfer data.

2. The advantages of the network are the noise immunity from Bluetooth and WiFi technologies, which operate in the same range of frequencies, as well as significantly lower power output emitted in the surrounding space. Among the disadvantages of

technology, one needs to mention a small range of performance and a small selection of a component base (especially single-crystal solutions).

3. When creating a device containing several sensors it is recommended to use a separate application microcontroller and a separate transceiver. The configuration of the PCB tracks with microwave elements must be taken from the manufacturer's description of the chip.

4. To increase the life of the batteries, the desired voltage supply should be made with a DC / DC converter. It is also necessary to provide for the switch-off of the signal amplifiers of the sensors when measurement of parameters is not carried out.

Tasks delivered at the beginning of work were completed. The work is performed in accordance with the state standard.

Додаток Б

Перелік елементів

Додаток В

Схема електрична принципова